

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

## **DIPLOMSKI RAD**

**Mirko Ivačić**

Zagreb, 2018.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

## **DIPLOMSKI RAD**

Mentor:

Prof. dr. sc. Daniel Rolph Schneider, dipl. ing.

Student:

Mirko Ivačić

Zagreb, 2018.

*Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.*

*Zahvaljujem mentoru, prof. dr. sc. Danielu Rolph Schneideru na pruženoj mogućnosti rada na zanimljivoj temi i na korisnim savjetima tijekom izrade ovog diplomskog rada te doc. dr. sc. Mislavu Čehilu na savjetima vezano za optimiranje i poboljšanje procesa.*

*Posebno zahvaljujem svojoj obitelji na pruženoj podršci za vrijeme trajanja studija.*

Mirko Ivačić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:  
procesno-energetski, konstrukcijski, brodogradnja i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur. broj:	

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Mirko Ivačić**

Mat. br.: 0035191306

Naslov rada na  
hrvatskom jeziku:

**Optimiranje kombiniranog kogeneracijskog postrojenja u cilju  
postizanja kriterija visoke učinkovitosti**

Naslov rada na  
engleskom jeziku:

**Optimization of the combined cogeneration plant in order to achieve  
high efficiency criteria**

Opis zadatka:

U okviru diplomskog rada potrebno je napraviti termodinamički proračun kombiniranog kogeneracijskog postrojenja bloka C TE-TO Sisak, instalirane električne snage od 230 MWe i toplinske snage 50 MWt.

Pri tome treba:

1. Napraviti matematički model kombiniranog kogeneracijskog postrojenja bloka C TE-TO Sisak u jednom od programskih alata koji će obuhvatiti modele plinske turbine s generatorom, kotla na ispušne plinove iz plinske turbine te kondenzacijske parne turbine s oduzimanjem pare za centralizirani toplinski sustav (CTS) grada Siska. Nacrtati shemu.
2. Optimirati proces (varirati oduzimanje pare: tlak i temperaturu, razmotriti eventualno potrebnu dodatnu opremu, i dr.) na takav način da termoelektrana postigne kriterij visoke učinkovitosti, uz maksimalni profit odnosno minimalne gubitke, pri različitim opterećenjima pogona.
3. Gore navedeno pod 2. razmotriti i u uvjetima proširenja toplinske mreže grada Siska (povećanje toplinskog konzuma).
4. Analizirati rad postrojenja u različitim okolišnim uvjetima. Izračunati stupanj iskoristivosti postrojenja kao i emisije po MWh proizvedene energije odnosno toni izgorenog goriva, za različita (toplinska i električna) opterećenja.
5. Odrediti ekonomsku isplativost postrojenja uz korištenje poticajne tarife (status povlaštenog proizvođača), ukoliko je zadovoljen kriterij visoke učinkovitosti.

Potrebni podaci za izračun mogu se dobiti kod mentora te u samoj TE-TO Sisak.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

Datum predaje rada:

Predviđeni datum obrane:

16. studenog 2017.

18. siječnja 2018.

24., 25. i 26. siječnja 2018.

Zadatak zadao:

Predsjednica Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Daniel Rolph Schneider

Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić

## SADRŽAJ

POPIS SLIKA .....	III
POPIS TABLICA.....	VI
POPIS OZNAKA .....	VII
POPIS KRATICA .....	X
SAŽETAK.....	XI
SUMMARY .....	XII
1. UVOD.....	1
1.1. Kružni procesi .....	2
1.1.1. Braytonov kružni proces .....	2
1.1.2. Rankine-ov kružni proces.....	3
1.1.3. Kombinirani proces .....	4
1.2. Kogeneracija.....	5
2. OPIS POSTROJENJA .....	6
2.1. Plinsko-turbinski agregat.....	6
2.2. Kotao na ispušne plinove .....	7
2.3. Parno-turbinski agregat .....	8
3. MATEMATIČKI MODEL BLOKA C TE-TO SISAK .....	9
3.1. Termodinamički proračun plinsko-turbinskog dijela .....	9
3.1.1. Kompresor.....	10
3.1.2. Komora izgaranja .....	11
3.1.3. Plinska turbina.....	14
3.2. Termodinamički proračun kotla na ispušne plinove .....	15
3.3. Termodinamički proračun parne turbine .....	16
3.4. EBSILON Professional .....	19
3.4.1. Design mode i Off-design mode .....	20
3.4.2. Stodolin zakon [14,15] .....	20
3.5. Postavke modela postojećeg postrojenja .....	22
4. REZULTATI ZA POSTOJEĆE POSTROJENJE .....	27
4.1. Rad postrojenja za zimsko, prijelazno i ljetno razdoblje .....	27
4.2. Promjena opterećenja .....	28
4.3. Promjena stanja okolišnog zraka.....	32
4.3.1. Utjecaj promjene tlaka zraka.....	32
4.3.2. Utjecaj promjene temperature zraka .....	36
4.3.3. Utjecaj promjene relativne vlažnosti zraka .....	46
4.4. Rad postrojenja u ovisnosti o toplinskoj snazi procesne pare .....	48
4.5. Proračun emisija .....	55

5. VISOKOUČINKOVITA KOGENERACIJA.....	63
5.1. Pravilnik o obnovljivim izvorima energije i visokoučinkovitoj kogeneraciji.....	63
5.1.1. Uvjeti korištenja toplinske energije u proizvodnim postrojenjima koja istovremeno proizvode električnu i toplinsku energiju [21] .....	66
5.1.2. Postupak određivanja uštede primarne energije za kogeneracijska postrojenja ...	67
5.1.3. Određivanje električne energije proizvedene u kogeneracijskom postrojenju.....	68
5.1.3.1. Izračun električne energije iz kogeneracije prema stvarnom ili teoretskom omjeru električne i toplinske energije [21] .....	69
5.1.4. Određivanje ukupne godišnje učinkovitosti za kogeneracijska postrojenja.....	70
5.2. Izračun uštede primarne energije za postojeće postrojenje .....	71
6. OPTIMIRANJE I POBOLJŠANJE PROCESA .....	74
6.1. Promjena parametara oduzimanja pare na kondenzacijskoj parnoj turbini.....	74
6.1.1. Promjena tlaka oduzimanja .....	74
6.1.2. Zajednički utjecaj promjene temperature i tlaka oduzimanja .....	78
6.1.3. Utjecaj dodatnog oduzimanja pare .....	80
6.2. Povećanje toplinske snage.....	81
6.2.1. Rezultati za povećanje toplinske snage .....	85
6.2.3. Izračun uštede primarne energije za poboljšano postrojenje .....	87
6.2.4. Ekonomska analiza.....	90
ZAKLJUČAK .....	94
LITERATURA.....	96

## POPIS SLIKA

Slika 1.1: Zatvoreni Brayton-ov ciklus .....	2
Slika 1.2: T,s dijagram Brayton-ovog procesa [2] .....	2
Slika 1.3: Shema Rankine-ovog procesa .....	3
Slika 1.4: T,s dijagram Rankine-ovog procesa [2] .....	3
Slika 1.5: Shema kombiniranog procesa .....	4
Slika 1.6: T,s dijagram kombiniranog procesa [2] .....	4
Slika 1.7: Kogeneracijsko postrojenje .....	5
Slika 2.1: Plinska turbina GTE-160 [5] .....	6
Slika 2.2: Kotao na ispušne plinove [6] .....	7
Slika 2.3: Parna turbina [7] .....	8
Slika 3.1: Shema bloka C TE-TO Sisak .....	9
Slika 3.2: Plinsko-turbinski dio .....	10
Slika 3.3: Komora izgaranja .....	13
Slika 3.4: Shema kotla na ispušne plinove .....	15
Slika 3.5: Parno-turbinski dio .....	17
Slika 3.6: Shema kondenzatora .....	18
Slika 3.7: Stodolin konus [14] .....	21
Slika 3.8: Omjer vrijednosti na osima [14] .....	21
Slika 3.9: Svojstva komponente plinske turbine .....	23
Slika 3.10: Definiranje vrijednosti na liniji radnog medija .....	23
Slika 3.11: Svojstva komponente kontrolera .....	24
Slika 3.12: Svojstva komponente VT isparivača .....	25
Slika 3.13: Svojstva komponente VT pregrijača .....	26
Slika 4.1: Ovisnost snaga o opterećenju .....	28
Slika 4.2: Ovisnost iskoristivosti o opterećenju .....	29
Slika 4.3: Ovisnost masenog protoka o opterećenju .....	29
Slika 4.4: Ovisnost faktora pretička zraka o opterećenju .....	30
Slika 4.5: Ovisnost protoka VT pare o opterećenju .....	30
Slika 4.6: Promjene tlakova u VT turbinskom stupnju promjenom opterećenja .....	31
Slika 4.7: T,s dijagram plinsko-turbinskog dijela postrojenja za različita opterećenja .....	31
Slika 4.8: Utjecaj tlaka okolišnog zraka na gustoću zraka .....	32
Slika 4.9: Utjecaj okolišnog tlaka na protok zraka i dimnih plinova .....	33
Slika 4.10: Utjecaj promjene okolišnog tlaka na snage .....	33
Slika 4.11: Utjecaj tlaka okolišnog zraka na stupnjeve iskoristivosti .....	34
Slika 4.12: Ovisnost tlaka na izlazu iz kompresora i kompresijskog omjera o okolišnom tlaku .....	34
Slika 4.13: Ovisnost temperature zraka na izlazu iz kompresora o okolišnom tlaku .....	35
Slika 4.14: Ovisnost izentropskog stupnja djelovanja kompresora o okolišnom tlaku .....	35
Slika 4.15: T,s dijagram plinsko-turbinskog dijela kod promjene okolišnog tlaka .....	36
Slika 4.16: Promjena gustoće zraka promjenom temperature .....	37
Slika 4.17: Utjecaj temperature zraka na protok zraka i protok dimnih plinova .....	38
Slika 4.18: Utjecaj temperature okolnog zraka na snagu plinske turbine i ukupnu snagu .....	38
Slika 4.19: Utjecaj temperature okolnog zraka na snagu parne turbine .....	39
Slika 4.20: Utjecaj temperature okolnog zraka na temperaturu na izlazu iz plinske turbine ...	40

Slika 4.21: Svojstva dimnih plinova i pare (vode) na VT isparivaču kod različite temperature okolnog zraka .....	40
Slika 4.22: q,T dijagram VT isparivača za različite temperature okolišnog zraka .....	41
Slika 4.23: Utjecaj temperature okolnog zraka na maseni protok VT pare .....	41
Slika 4.24: Utjecaj temperature okolnog zraka na iskoristivost plinske turbine .....	42
Slika 4.25: Utjecaj temperature okolnog zraka na električni (ukupni) stupanj iskoristivosti postrojenja .....	43
Slika 4.26: Utjecaj temperature okolnog zraka na uloženu toplinsku snagu goriva i ukupnu snagu .....	43
Slika 4.27: Utjecaj temperature okolnog zraka na tlak zraka na izlazu iz kompresora .....	44
Slika 4.28: Utjecaj temperature okolnog zraka na temperaturu zraka na izlazu iz kompresora .....	44
Slika 4.29: T,s dijagram Rankine-ovog procesa za različite temperature okolnog zraka .....	45
Slika 4.30: T,s dijagram plinsko-turbinskog dijela za različite temperature okolnog zraka ....	46
Slika 4.31: Utjecaj promjene relativne vlažnosti zraka na snagu plinske turbine .....	47
Slika 4.32: Utjecaj promjene relativne vlažnosti zraka na snagu kompresora .....	47
Slika 4.33: Utjecaj promjene relativne vlažnosti zraka na ukupnu snagu .....	47
Slika 4.34: Utjecaj relativne vlažnosti na električnu iskoristivost postrojenja .....	48
Slika 4.35: Utjecaj toplinske snage na maseni protok oduzimanja pare .....	49
Slika 4.36: Ovisnost snage parne turbine o toplinskoj snazi .....	49
Slika 4.37: Utjecaj promjene toplinske snage na ukupnu snagu postrojenja .....	50
Slika 4.38: Utjecaj promjene toplinske snage na stupnjeve iskoristivosti .....	50
Slika 4.39: T,s dijagram s i bez oduzimanja pare .....	51
Slika 4.40: Snaga parne turbine s i bez oduzimanja pare i toplinska snaga procesne pare pri različitim opterećenjima .....	52
Slika 4.41: Regulacija temperature pare oduzimanja .....	52
Slika 4.42: Stupnjevi iskoristivosti s i bez oduzimanja pare pri različitim opterećenjima .....	53
Slika 4.43: Utjecaj toplinske snage na snagu parne turbine kod različitih temperatura okolnog zraka .....	53
Slika 4.44: Utjecaj toplinske snage na ukupnu snagu kod različitih temperatura okolnog zraka .....	54
Slika 4.45: Utjecaj toplinske snage na iskoristivosti kod različitih temperatura okolnog zraka .....	54
Slika 4.46: Emisije NO <sub>x</sub> za karakterističan sat u zimskom i ljetnom razdoblju u ovisnosti o opterećenju .....	57
Slika 4.47: Emisije NO <sub>x</sub> po toni goriva u zimskom i ljetnom razdoblju u ovisnosti o opterećenju .....	58
Slika 4.48: Emisije NO <sub>x</sub> po MWh proizvedene energije u zimskom i ljetnom razdoblju u ovisnosti o opterećenju .....	58
Slika 4.49: Emisije CO za karakterističan sat u zimskom i ljetnom razdoblju u ovisnosti o opterećenju .....	59
Slika 4.50: Emisije CO po toni goriva u zimskom i ljetnom razdoblju u ovisnosti o opterećenju .....	59
Slika 4.51: Emisije CO po MWh proizvedene energije u zimskom i ljetnom razdoblju u ovisnosti o opterećenju .....	59
Slika 4.52: Emisije CO <sub>2</sub> za karakterističan sat u zimskom i ljetnom razdoblju u ovisnosti o opterećenju .....	61



Slika 4.53: Emisije CO <sub>2</sub> po toni goriva u zimskom i ljetnom razdoblju u ovisnosti o opterećenju .....	61
Slika 4.54: Emisije CO <sub>2</sub> po MWh proizvedene energije u zimskom i ljetnom razdoblju u ovisnosti o opterećenju .....	61
Slika 5.1: Energetska bilanca postrojenja s djelomičnim kogeneracijskim pogonom .....	69
Slika 6.1: Utjecaj promjene tlaka oduzimanja na VT i ST turbinski stupanj .....	76
Slika 6.2: Utjecaj promjene tlaka oduzimanja na NT turbinski stupanj .....	77
Slika 6.3: Utjecaj promjene tlaka oduzimanja na temperaturu oduzimanja .....	77
Slika 6.4: Utjecaj promjene temperature i tlaka oduzimanja na ukupni stupanj iskoristivosti .....	78
Slika 6.5: Utjecaj promjene temperature i tlaka oduzimanja na snagu parne turbine .....	79
Slika 6.6: Utjecaj promjene temperature i tlaka oduzimanja na snagu parne turbine i maseni protok oduzimanja .....	79
Slika 6.7: Shema postrojenja s dva oduzimanja pare .....	80
Slika 6.8: Izmjenjeni toplinski tok na zagrijaču kondenzata kod toplinske snage od 133 MW <sub>t</sub> .....	82
Slika 6.9: Povećanje toplinske snage ugradnjom dodatnog izmjenjivača na izlazu iz HRSG .....	83
Slika 6.10: Utjecaj površine dodatnog izmjenjivača na dodatnu toplinsku snagu .....	83
Slika 6.11: Ovisnost stupnjeva iskoristivosti o opterećenju kod različitih toplinskih snaga ....	86
Slika 6.12: Promjena električnih snaga u ovisnosti o opterećenju kod različitih toplinskih snaga .....	87
Slika 6.13: Usporedba utrošene i proizvedene energije u postojećem i poboljšanom postrojenju .....	88
Slika 6.14: Kretanje cijena električne energije na europskom tržištu .....	91

## POPIS TABLICA

Tablica 1.1: Režimi rada bloka C .....	1
Tablica 2.1: Parametri plinske turbine kod ISO uvjeta okoliša.....	6
Tablica 3.1: Molarni sastav prirodnog plina .....	11
Tablica 3.2: Nominalne vrijednosti kod punog opterećenja .....	22
Tablica 3.3: Izmjenjivači topline u kotlu na ispušne plinove.....	25
Tablica 4.1: Srednje vrijednosti temperature, tlaka i relativne vlažnosti zraka u gradu Sisku	27
Tablica 4.2: Rad postrojenja za različita razdoblja .....	28
Tablica 4.3: Konstantni parametri kod promjene tlaka okolišnog zraka.....	32
Tablica 4.4: Konstantni parametri kod promjene temperature okolišnog zraka .....	36
Tablica 4.5: Konstantni parametri kod promjene toplinske snage .....	48
Tablica 4.6: Emisije NO <sub>x</sub> i CO uz garantirane vrijednosti .....	56
Tablica 4.7: Emisije NO <sub>x</sub> kod različitih opterećenja za zimsko razdoblje .....	56
Tablica 4.8: Emisije NO <sub>x</sub> kod različitih opterećenja za ljetno razdoblje .....	57
Tablica 4.9: Sastav dimnih plinova za zimsko i ljetno razdoblje .....	60
Tablica 4.10: Sastav dimnih plinova za različita opterećenja .....	60
Tablica 4.11: Godišnje emisije .....	62
Tablica 5.1: Zadani omjer električne i toplinske energije ovisno o tipu tehnologije .....	70
Tablica 5.2: Godišnji program rada postrojenja .....	71
Tablica 5.3: Utrošena i proizvedena energija u postojećem postrojenju.....	72
Tablica 6.1: Utjecaj promjene tlaka oduzimanja na snagu na generatoru parne turbine i ukupnu iskoristivost .....	75
Tablica 6.2: Utjecaj tlaka oduzimanja na mehaničku snagu VT i ST turbinskog stupnja .....	76
Tablica 6.3: Utjecaj dodatnog oduzimanja na ukupnu iskoristivost i snagu parne turbine.....	80
Tablica 6.4: Usporedba rezultata kod povećanja toplinske snage.....	85
Tablica 6.5: Rezultati za različita opterećenja kod povećane toplinske snage.....	86
Tablica 6.6: Utrošena i proizvedena energija u poboljšanom postrojenju .....	88
Tablica 6.7: Cijene električne energije.....	91
Tablica 6.8: Cijena goriva i toplinske energije .....	91
Tablica 6.9: Ukupni prihod, ukupni trošak i gubitak/zarada za 1. slučaj .....	92
Tablica 6.10: Ukupni prihod, ukupni trošak i gubitak/zarada za 2. slučaj .....	92
Tablica 6.11: Ukupni prihod, ukupni trošak i gubitak/zarada za 3. slučaj .....	93
Tablica 6.12: Ukupni prihod, ukupni trošak i gubitak/zarada poboljšanog postrojenja za cijenu plina od 31 €/MWh.....	93
Tablica 6.13: Ukupni prihod, ukupni trošak i gubitak/zarada postojećeg postrojenja za cijenu plina od 31 €/MWh.....	93

## POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
$T_{1z}$	K	Temperatura zraka na usisu u kompresor
$T_{2z,s}$	K	Temperatura zraka na kraju izentropske kompresije
$p_{1z}$	bar	Tlak zraka na usisu u kompresor
$p_{2z}$	bar	Tlak zraka na kraju kompresije
$\eta_k$	-	Izentropski stupanj djelovanja kompresora
$\kappa_{zr}$	-	Izentropski eksponent zraka
$P_k$	MW	Snaga kompresora
$P_{s,k}$	MW	Snaga kompresora za izentropsku kompresiju
$h_{1z}$	kJ/kg	Specifična entalpija zraka prije kompresije
$h_{2z,s}$	kJ/kg	Specifična entalpija zraka na kraju izentropske kompresije
$h_{2z}$	kJ/kg	Specifična entalpija zraka na kraju kompresije
$q_{m,z}$	kg/s	Maseni protok zraka
$T_{2z}$	K	Temperatura zraka na kraju kompresije
$M_g$	kg/kmol	Molarna masa goriva
$M_i$	kg/kmol	Molarna masa sudionika u gorviu
$y_i$	kmol <sub>i</sub> /kmol <sub>g</sub>	Molarni udio sudionika u gorviu
$V_{m,g}$	m <sup>3</sup> /kmol	Molarni volumen goriva
$T_g$	K	Temperatura goriva
$p_{ok,ISO}$	bar	Tlak okolišnog zraka kod ISO uvjeta okoliša
$R_m$	kJ/(kmol K)	Opća plinska konstanta
$\rho_g$	kg/m <sup>3</sup>	Gustoća goriva
$H_d$	kJ/kg	Donja ogrjevna vrijednost goriva
$H_{d,v}$	MJ/m <sup>3</sup>	Donja ogrjevna vrijednost goriva izražena po m <sup>3</sup> goriva
$V_{O_2,min}$	m <sup>3</sup> /kg	Minimalna potrebna količina kisika za potpuno izgaranje 1 kg goriva
$V_{z,min}$	m <sup>3</sup> /kg	Minimalna potrebna količina zraka za potpuno izgaranje 1 kg goriva
$V_z$	m <sup>3</sup> /kg	Stvarna potrebna količina zraka za potpuno izgaranje 1 kg goriva
$\lambda$	-	Faktor pretička zraka
$V_{CO_2}$	m <sup>3</sup> /kg	Količina ugljikovog dioksida u dimnim plinovima kod izgaranja 1 kg goriva
$V_{N_2,min}$	m <sup>3</sup> /kg	Količina dušika u dimnim plinovima kod izgaranja 1 kg goriva
$V_{H_2O}$	m <sup>3</sup> /kg	Količina vodene pare u dimnim plinovima kod izgaranja 1 kg goriva

$V_{dp}$	$m^3/kg$	Količina dimnih plinova kod izgaranja 1 kg goriva
$\rho_{dp}$	$kg/m^3$	Gustoća dimnih plinova
$q_{m,dp}$	$kg/s$	Maseni protok dimnih plinova
$q_{m,g}$	$kg/s$	Maseni protok goriva
$h_{3dp}$	$kJ/kg$	Specifična entalpija dimnih plinova na ulazu u plinsku turbinu
$p_{3dp}$	bar	Tlak na ulazu u plinsku turbinu
$p_{4dp}$	bar	Tlak na izlazu iz plinske turbine
$\varepsilon_k$	-	Kompresijski omjer
$T_{3dp}$	K	Temperatura dimnih plinova na ulazu u plinsku turbinu
$T_{4dp,s}$	K	Izentropska temperatura dimnih plinova na izlazu iz plinske turbine
$\kappa_{dp}$	-	Izentropski eksponent dimnih plinova
$\eta_t$	-	Izentropski stupanj djelovanja plinske turbine
$T_{4dp}$	K	Temperatura dimnih plinova na izlazu iz plinske turbine
$P_{pl,t}$	MW	Snaga plinske turbine
$P_{PT}$	MW	Snaga plinsko-turbinskog dijela
$P_{el,PT}$	MW <sub>e</sub>	Snaga na generatoru plinske turbine
$\eta_{el}$	-	Električni stupanj djelovanja generatora električne struje
$\eta_{meh,PT}$	-	Mehanički stupanj djelovanja plinske turbine
$\eta_{el,PT}$	-	Električni stupanj iskoristivosti plinsko-turbinskog dijela
$\Phi$	kW	Toplinski tok izmjenjen na pojedinom izmjenjivaču topline
$h_{dp}$	$kJ/kg$	Specifična entalpija dimnih plinova
$h_p$	$kJ/kg$	Specifična entalpija vodene pare
$q_{m,pVT}$	$kg/s$	Maseni protok visokotlačne pare
$k$	$kW/(m^2 K)$	Koeficijent prolaza topline
$A$	$m^2$	Površina izmjenjivača topline
$\Delta T_m$	K	Srednja logaritamska temperaturna razlika
$h_w$	$kJ/kg$	Specifična entalpija kondenzata nakon napojnih pumpi
$q_{m,pNT}$	$kg/s$	Maseni protok niskotlačne pare
$h_{kond}$	$kJ/kg$	Specifična entalpija kondenzata iz kondenzatora
$q_{m,kond}$	$kg/s$	Maseni protok kondenzata iz kondenzatora
$\Delta T_1$	K	Gornja temperaturna razlika
$\Delta T_2$	K	Donja temperaturna razlika
$T_{dp,u}$	K	Temperatura dimnih plinova na ulazu u pojedini izmjenjivač
$T_{dp,i}$	K	Temperatura dimnih plinova na izlazu iz pojedinog izmjenjivača
$T_{p(w),u}$	K	Temperatura pare (vode) na ulazu u izmjenjivač

$T_{p(w),i}$	K	Temperatura pare (vode) na izlazu iz pojedinog izmjenjivača
$P_{VT}$	MW	Snaga visokotlačnog stupnja turbine
$P_{ST}$	MW	Snaga srednjetačnog stupnja turbine
$q_{m,pST}$	kg/s	Maseni protok pare kroz srednjetačni turbinski stupanj
$q_{m,pOD}$	kg/s	Maseni protok oduzimanja pare
$q_{m,pOTP}$	kg/s	Maseni protok pare na ulazu u otplinjač
$P_{NT}$	MW	Snaga niskotlačnog stupnja turbine
$P_{el,PAT}$	MW <sub>e</sub>	Snaga na generatoru parne turbine
$\eta_{meh,PAT}$	-	Mehanički stupanj djelovanja parne turbine
$\eta_{el,uk}$	-	Električni stupanj iskoristivosti kombiniranog postrojenja
$\eta_{uk}$	-	Stupanj iskoristivosti kombiniranog kogeneracijskog postrojenja
$Q_T$	MW <sub>t</sub>	Toplinska snaga
$q_{m,w}$	kg/s	Protok rashladne vode za hlađenje kondenzatora
$h_{w,i}$	kJ/kg	Specifična entalpija rashladne vode na izlazu iz kondenzatora
$h_{w,u}$	kJ/kg	Specifična entalpija rashladne vode na ulazu u kondenzator

## POPIS KRATICA

<b>Kratika</b>	<b>Opis</b>
KKE	Kombi kogeneracijska elektrana
HRSG	Heat recovery steam generator
PMRS	Plinska mjerno-redukcijska stanica
CTS	Centralizirani toplinski sustav
CHP	Combined heat and power
TE-TO	Termoelektrana-toplana
VT	Visokotlačni
NT	Niskotlačni
ST	Srednjetlačni
NCV	Net calorific value
GVE	Granične vrijednosti emisija
VUK	Visokoučinkovita kogeneracija
UPE	Ušteda primarne energije
OIE	Obnovljivi izvori energije
HERA	Hrvatska energetska regulatorna agencija
RC	Referentna cijena električne energije
EU	Europska unija

## SAŽETAK

Tema ovog diplomskog rada je optimiranje kombiniranog kogeneracijskog postrojenja u cilju postizanja kriterija visoke učinkovitosti. Postrojenje za koje je provedena analiza je blok C u TE-TO Sisak, instalirane snage  $230 \text{ MW}_e/50 \text{ MW}_t$ . U tu svrhu napravljen je matematički model plinsko-turbinskog dijela, kotla na ispušne plinove iz plinske turbine i parno-turbinskog dijela postrojenja u programskom alatu Ebsilon Professional, u kojem je provedena analiza rada postrojenja za različita opterećenja plinske turbine i pri različitim okolišnim uvjetima. Prikazan je detaljan utjecaj promjene tlaka, temperature i relativne vlažnosti okolišnog zraka na rad postrojenja te rad postrojenja i emisije za zimsko, prijelazno i ljetno razdoblje. Analiziran je i rad postrojenja u ovisnosti o toplinskoj snazi pare oduzimanja.

S obzirom da je cilj da blok C postane visokoučinkovito kogeneracijsko postrojenje te ostvari poticaje, opisani su uvjeti koje je potrebno zadovoljiti da bi postrojenje steklo status povlaštenog proizvođača električne energije. Prikazan je izračun uštede primarne energije za kogeneracijska postrojenja.

Optimiranje postrojenja je provedeno promjenom parametara oduzimanja pare na kondenzacijskoj parnoj turbini i povećanjem toplinske snage postrojenja te su dani rezultati. Prikazana je usporedba proizvedene i utrošene energije te usporedba prihoda i troškova za postojeće i poboljšano postrojenje.

Ključne riječi: kombinirano kogeneracijsko postrojenje, visokoučinkovita kogeneracija, Ebsilon, optimiranje, stupanj iskoristivosti, ušteda primarne energije, matematički model

## **SUMMARY**

Subject of this thesis is optimization of the combined cogeneration plant in order to achieve high efficiency criteria. Analysis was conducted for CHP plant Sisak C, which has installed power of 230 MW<sub>e</sub>/50 MW<sub>t</sub>. Mathematical model of a gas turbine, heat recovery steam generator and steam turbine was made in the software Ebsilon Professional. In Ebsilon, analysis of a different gas turbine loads and different environmental conditions was conducted. A detailed influence of the change of pressure, temperature and relative air humidity was shown. Emissions were calculated for winter, spring and summer period. Influence of the thermal power of the extraction steam was also shown.

Since the goal is to achieve high efficiency criteria and thus get incentives, terms that need to be fulfilled, in order to plant acquire status of a favored electricity producer, was described. Calculation of the primary energy saving for cogeneration plant was shown.

Optimization of the plant was carried out by changing parameters of extraction steam and by increasing thermal power output of the plant. Energy production and consumption, income and expenditure were compared for existing plant and for improved plant.

Key words: combined cogeneration plant, high efficiency cogeneration, Ebsilon, optimization, efficiency, primary energy saving, mathematical model



## 1. UVOD

Kombi kogeneracijska elektrana Sisak C (KKE Sisak ili blok C) ima instaliranu snagu od 230 MW<sub>e</sub> i 50 MW<sub>t</sub> te služi za istovremenu proizvodnju električne i toplinske energije. Glavni dijelovi postrojenja su: plinska turbina s generatorom, kotao na ispušne plinove iz plinske turbine s dimnjakom visine 65 m (HRSG), parna turbina s generatorom, rasklopište 220 kV s transformatorima, plinska mjerno-redukcijska stanica (PMRS).

Pogonsko gorivo plinske turbine je prirodni plin. Plinsko-turbinski agregat proizvodi električnu energiju, a otpadna toplota ispušnih plinova koristi se za proizvodnju vodene pare u kotlu na ispušne plinove. Vodena para se većim dijelom koristi za proizvodnju električne energije u parno-turbinskom agregatu, a manji dio se odvodi u centralizirani toplinski sustav (CTS) grada Siska. Kombi blok je tako konfiguriran da omogućava održavanje opterećenja u rasponu od 70% do 100%. Parna turbina je kondenzacijska s oduzimanjem pare za CTS. U tablici 1.1 prikazani su različiti režimi rada bloka C [1].

**Tablica 1.1: Režimi rada bloka C**

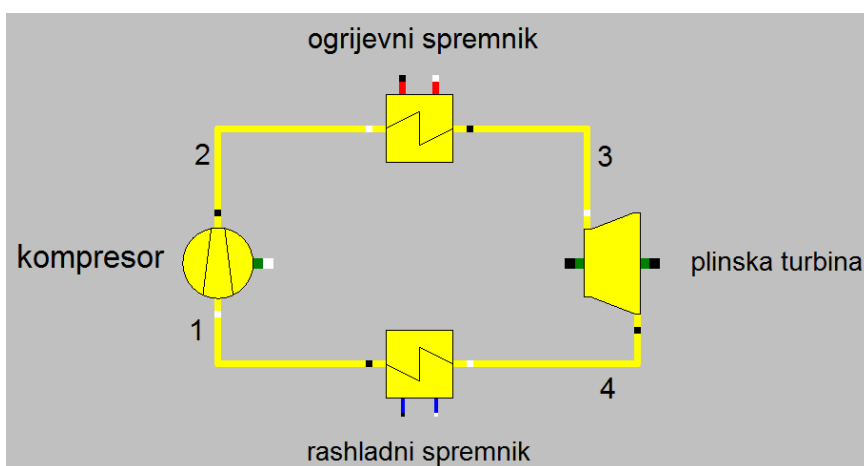
Režim rada:		A	B	C	D
		zima 70 %	ljetno	zima	optimum
Potrošnja prirodnog plina $H_d = 46261 \text{ kJ/kg}$	kg/s	7,89	9,5	10,13	9,88
	MW	365,00	439,48	468,62	457,06
Oduzimanje pare za CTS	t/h	65	0	65	35
	bar	16	16	16	16
	°C	300	300	300	300
	kJ/kg	3036	3036	3036	3036
	MW	54,47	0	54,47	29,33
Bruto snaga i bruto st. djelovanja plinsko-turbinskog agregata	MW	112,3	146,4	159,7	154,6
	%	30,77%	33,31%	34,08%	33,82%
Bruto snaga parno-turbinskog agregata	MW	52,75	80,4	69,35	76,02
Vlastita potrošnja bloka	MW	1,46	1,77	1,79	1,79
<b>Neto snaga bloka</b>	<b>MW</b>	<b>163,59</b>	<b>225,03</b>	<b>227,26</b>	<b>228,83</b>
<b>Neto stupanj djelovanja bloka za proizvedenu el. energiju</b>	<b>%</b>	<b>44,82%</b>	<b>51,20%</b>	<b>48,50%</b>	<b>50,07%</b>
<b>Ukupni neto st. djelovanja bloka</b>	<b>%</b>	<b>59,74%</b>	<b>51,20%</b>	<b>60,12%</b>	<b>56,48%</b>

## 1.1. Kružni procesi

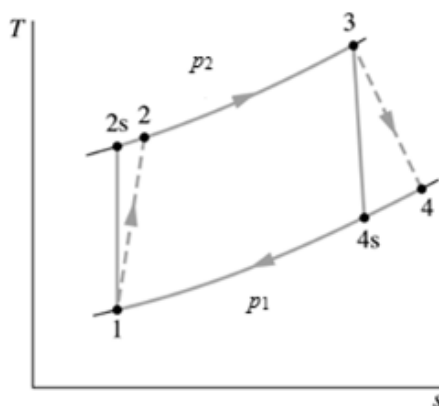
S obzirom da se u termoenergetskim postrojenjima odvijaju kružni termodinamički procesi ukratko će se opisati pojedini procesi i njihove karakteristike te kombinacija tih procesa.

### 1.1.1. Braytonov kružni proces

Plinsko-turbinski procesi opisuju se Brayton-ovim kružnim procesom koji se odvija između dvije izobare i dvije izentroke. Brayton-ov kružni proces je zatvoreni ciklus, a radna tvar je zrak koji se prvo komprimira, a potom izobarno zagrijava te ekspandira u plinskoj turbini pri čemu se dobiva mehanički rad, a dio tog rada koristi se za pogon kompresora. Kako bi se zrak vratio u početno stanje potrebno mu je odvesti toplinu pri konstantnom tlaku. Shema i T,s dijagram Brayton-ovog ciklusa prikazani su na slici 1.1, odnosno 1.2 [2].



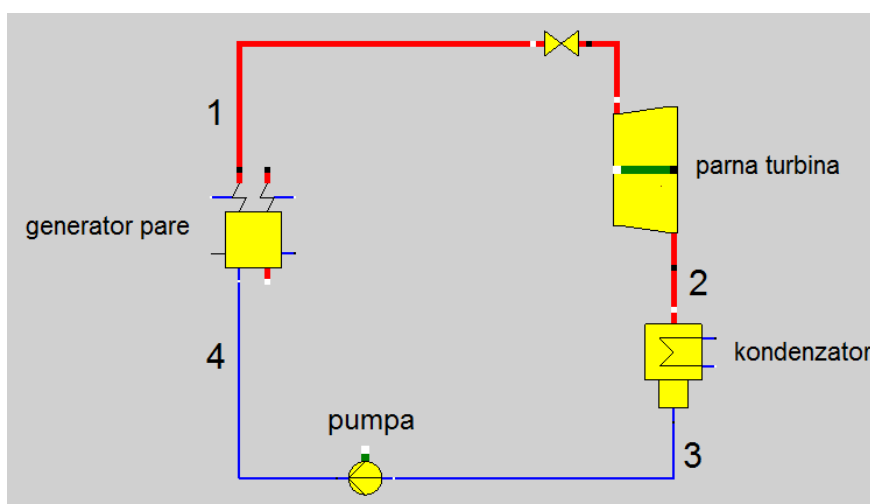
Slika 1.1: Zatvoreni Brayton-ov ciklus



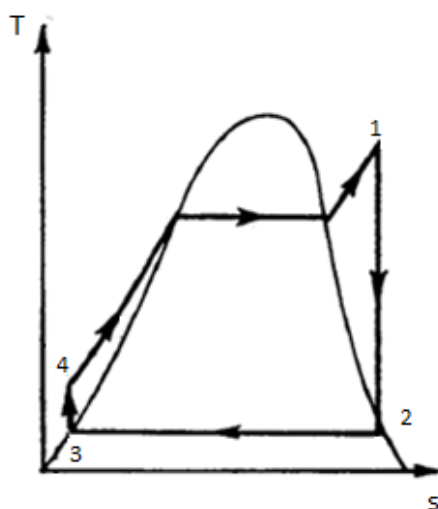
Slika 1.2: T,s dijagram Brayton-ovog procesa [2]

### 1.1.2. Rankine-ov kružni proces

Rankine-ov proces odvija se u parno-turbinskom dijelu postrojenja. U generatoru pare proizvodi se para visokog tlaka i temperature koja potom ekspandira u parnoj turbini do tlaka kondenzacije. U kondenzatoru para kondenzira te se nastali kondenzat pumpom dovodi natrag u generator pare čime se kružni proces zatvara. Na slici 1.3 prikazana je shema, a slikom 1.4 T,s dijagram Rankine-ovog procesa [2].



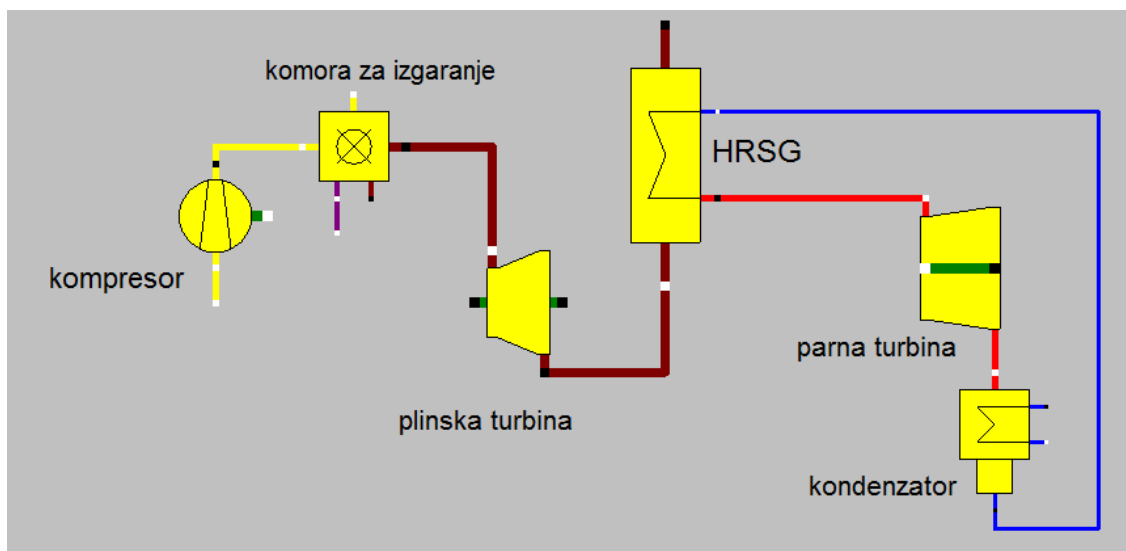
Slika 1.3: Shema Rankine-ovog procesa



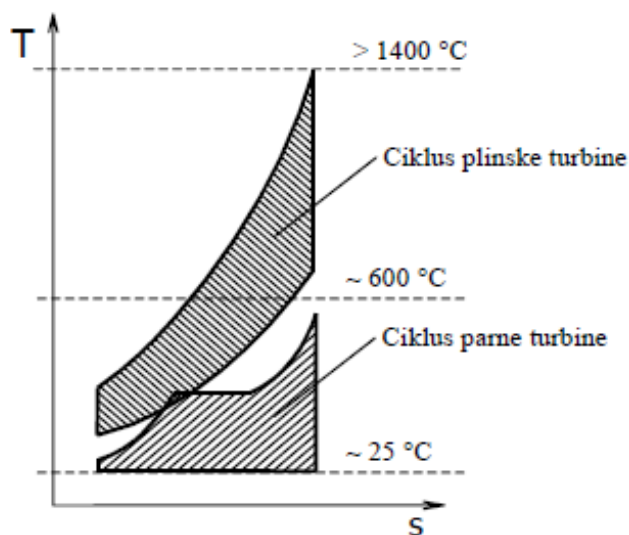
Slika 1.4: T,s dijagram Rankine-ovog procesa [2]

### 1.1.3. Kombinirani proces

Kombinirani proces sastoji se od plinsko-turbinskog i parno-turbinskog dijela. Otpadna toplina dimnih plinovi na izlazu iz plinske turbine koristi se za proizvodnju pare u generatoru pare na ispušne plinove (HRSG) čime se postiže stupanj iskoristivost do 60%. Shema kombiniranog procesa prikazana je na slici 1.5, a T,s dijagram na slici 1.6 [2].



Slika 1.5: Shema kombiniranog procesa



Slika 1.6: T,s dijagram kombiniranog procesa [2]

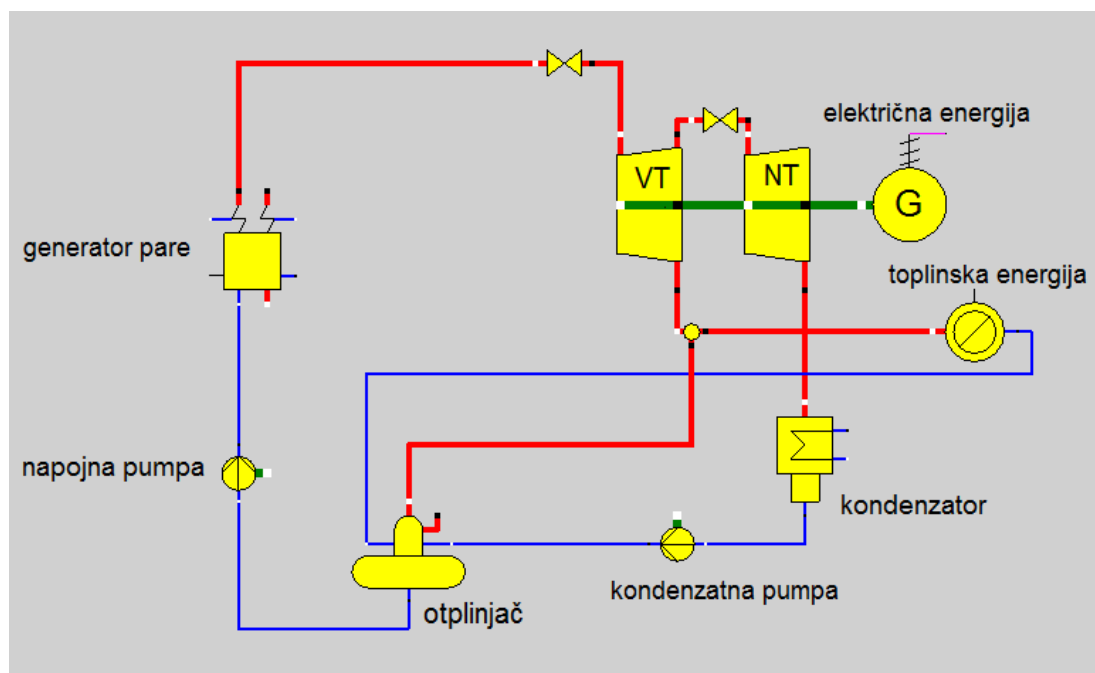
## 1.2. Kogeneracija

Kogeneracija (eng. CHP – combined heat and power) podrazumijeva istovremenu proizvodnju električne i toplinske energije. Proizvodnjom dodatne toplinske energije postiže se veća učinkovitost postrojenja jer se primarna energija goriva iskorištava na učinkovitiji način. Toplinska energija može se koristiti u industrijskim procesima kao tehnološka para ili za zagrijavanje prostora.

Tipovi kogeneracijskih postrojenja:

- postrojenje kondenzacijske turbine s reguliranim oduzimanjem pare
- postrojenje protutlačne turbine
- postrojenje plinske turbine s korištenjem otpadne topline dimnih plinova
- CHP motori

Slikom 1.7 prikazano je postrojenje s kondenzacijskom parnom turbinom s reguliranim oduzimanjem pare [2].

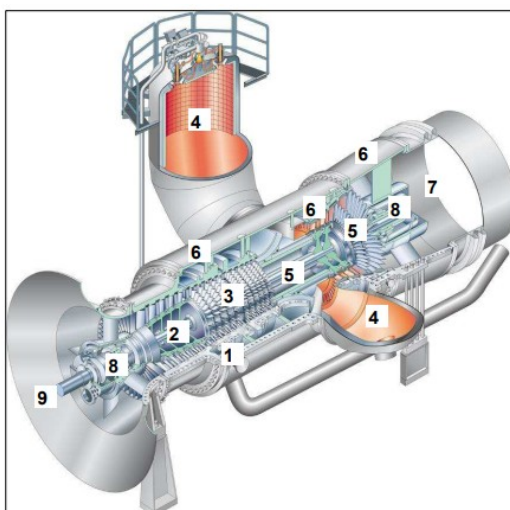


Slika 1.7: Kogeneracijsko postrojenje

## 2. OPIS POSTROJENJA

### 2.1. Plinsko-turbinski agregat

Plinsko-turbinski agregat proizvodi oko 160 MW električne snage izgaranjem prirodnog plina. Plinska turbina sastoji se od jednog kućišta i jednog vratila, ulaza zraka, aksijalnog kompresora, dvije vanjske komore izgaranja u dry low NO<sub>x</sub> izvedbi, aksijalne turbine, ispušnog kućišta, difuzora, ležajnih sklopova i temeljnog okvira s nosačima turbine. Model plinske turbine bloka C je GTE-160 (slika 2.1). Plinska turbina pogoni dvopolni, sinkroni, trofazni električni generator horizontalne izvedbe te je hlađen zrakom pomoću dva aksijalna ventilatora i hladnjacima zrak/voda [1,3]. U tablici 2.1 prikazani su parametri plinske turbine bloka C kod ISO uvjeta okoliša tj. temperature okolišnjeg zraka od 15 °C, tlaka zraka 1,013 bar i relativne vlažnosti zraka 60% [4].



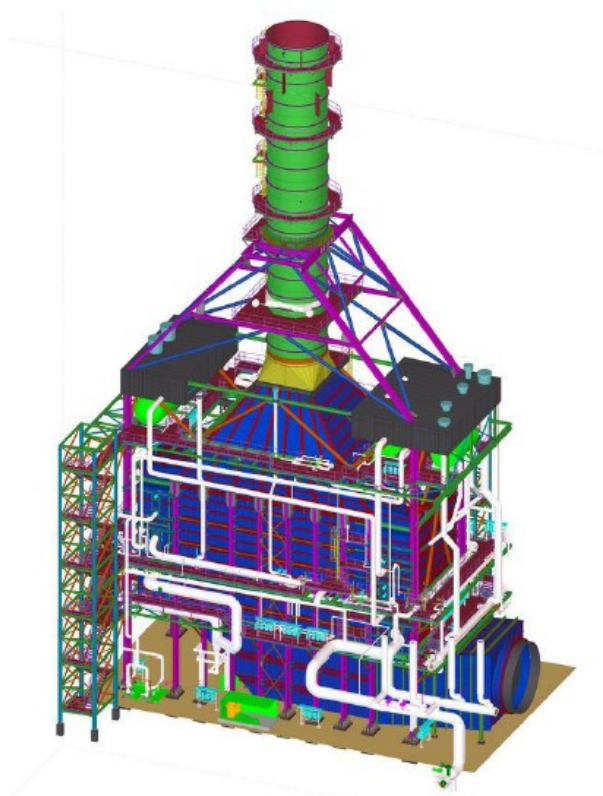
Slika 2.1: Plinska turbina GTE-160 [5]

Tablica 2.1: Parametri plinske turbine kod ISO uvjeta okoliša

Parametar	Iznos
snaga na generatoru [MW]	155,3
temperatura dimnih plinova na izlazu iz turbine [°C]	537
protok dimnih plinova [kg/s]	509
stupanj iskoristivosti [%]	34,1
tlak zraka na izlazu iz kompresora [bar]	11,45

## 2.2. Kotao na ispušne plinove

U kotlu na ispušne plinove (kotao utilizator, HRSG) koristi se otpadna toplina dimnih plinova iz ispuha plinske turbine za proizvodnju vodene pare. Kotao je izveden vertikalno (slika 2.2), bez dodatnog loženja, dvotlačni s bubnjem pare visokog tlaka (VT) i bubnjem pare niskog tlaka (NT), jednim pregrijanjem pare VT i jednim pregrijanjem pare NT, jednim zagrijačem vode VT te sa prisilnom cirkulacijom u krugovima isparavanja visokog i niskog tlaka para. Kotao je predviđen za rad u režimu kliznog tlaka. Temperatura dimnih plinova prije izlaska iz kotla smanjuje se u plinskom zagrijaču kondenzata iz kojeg se zagrijani kondenzat odvodi u otplinjač [1].

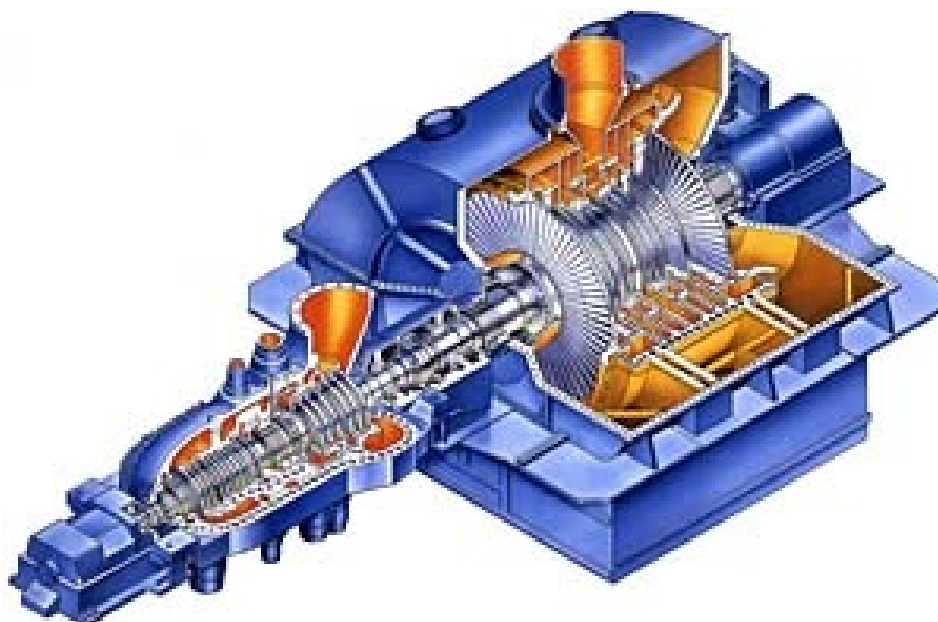


Slika 2.2: Kotao na ispušne plinove [6]

### 2.3. Parno-turbinski agregat

Parna turbina je kondenzacijskog tipa s oduzimanjem pare (slika 2.3). Turbina je jednovratilna, dvokućišna, postavljena na zajedničko vratilo s generatorom, a sastoji se od zajedničkog kućišta visokog i srednjeg tlaka te od zasebnog niskotlačnog kućišta. Svježa para se iz kotla dovodi cjevovodima u VT i NT brzozatvarajuće ventile i odgovarajuće kućište turbine. Za kontroliranje ulaza pare u turbinu koriste se paro-distribucijski ventili.

Iza grupe VT stupnjeva nalazi se otvor nereguliranog oduzimanja (nazivnog tlaka 16 bar). Preostala količina pare prolazi kroz NT stupnjeve prema kondenzatoru. Blok C je dimenzioniran tako da može oduzimati do 65 t/h pare nazivnog tlaka 16 bar. Količina pare koja se oduzima za potrebe CTS-a nadoknađuje se dodavanjem odgovarajuće količine demineralizirane vode [1].



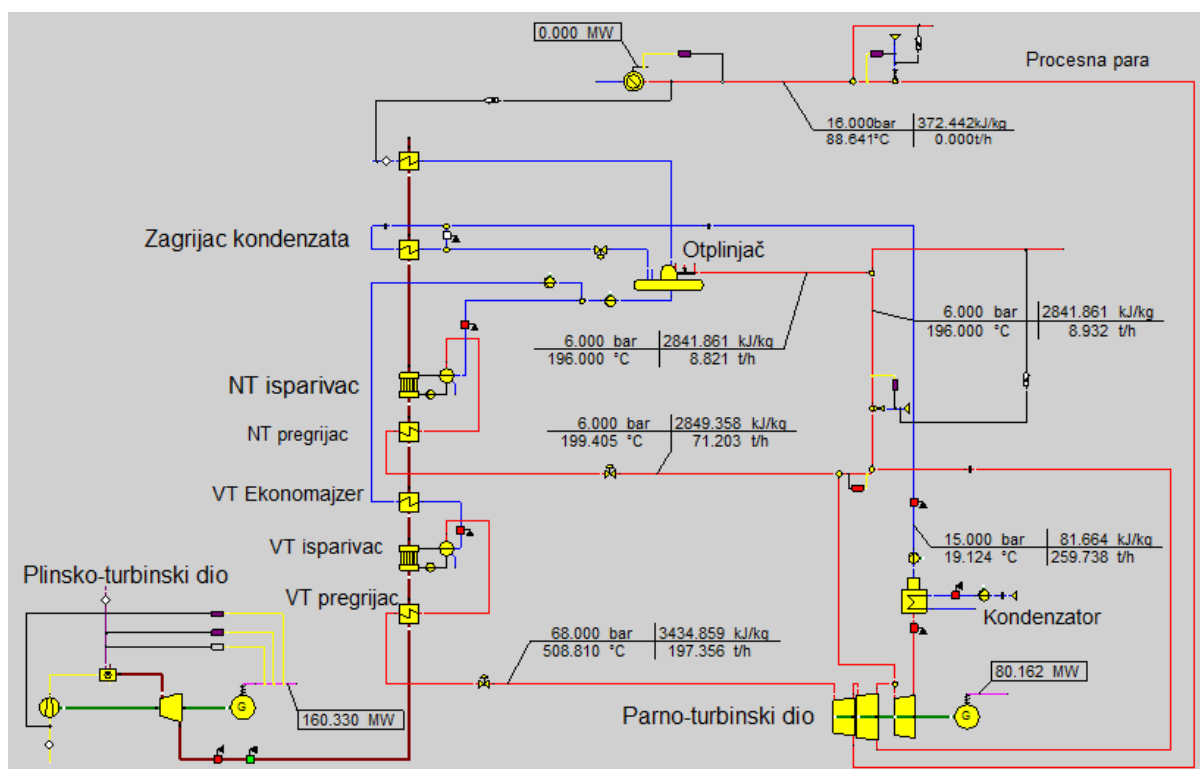
Slika 2.3: Parna turbina [7]



### 3. MATEMATIČKI MODEL BLOKA C TE-TO SISAK

U programskom paketu EBSILON Professional napravljen je matematički model bloka C. Uz minimalne preinake postojećeg modela u Ebsilon-u moguća je prilagodba bilo kojem režimu rada.

Na slici 3.1 prikazana je izrađena shema postrojenja u grafičkom sučelju programa EBSILON Professional. Elementi prikazani na slici predstavljaju skup jednažbi i funkcija koje provode proračun na temelju ulaznih vrijednosti ovisno o pojedinoj komponenti. Shema prikazuje osnovne dijelove postrojenja i pomoćne te regulacijske elemente.

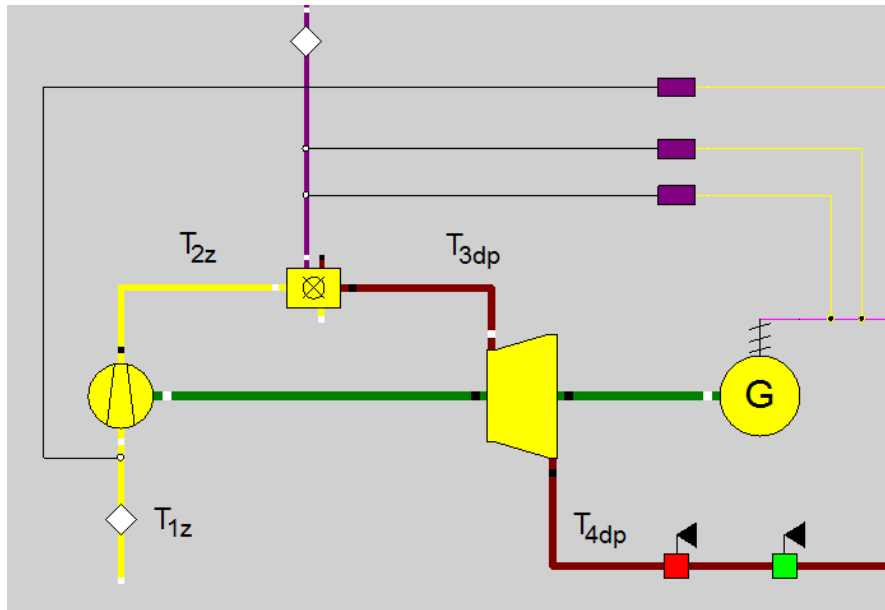


Slika 3.1: Shema bloka C TE-TO Sisak

#### 3.1. Termodinamički proračun plinsko-turbinskog dijela

Plinsko-turbinski dio sastoji se od kompresora, komora za izgaranje, plinske turbine i električnog generatora (slika 3.2). Kompresor dobavlja i komprimira zrak okolišnog stanja na stanje zahtijevano u komori izgaranja gdje dolazi do kemijske reakcije izgaranja goriva te nastaju dimni plinovi koji pogone plinsku turbinu. Kompresor je vratilom spojen na plinsku

turbinu te se potrebni rad za kompresiju dobiva od turbine, a ostatak je električna energija na generatoru.



Slika 3.2: Plinsko-turbinski dio

### 3.1.1. Kompresor

Proces na plinsko-turbinskom dijelu postrojenja započinje kompresijom zraka okolišnog stanja ( $T_{1z}$ ,  $p_{1z}$ ) te ga komprimira na tlak  $p_{2z}$ . Izentropska temperatura na kraju kompresije određuje se prema (3.1) [8], a izentropski stupanj djelovanja kompresora prema (3.2) [9]

$$\frac{T_{2z,s}}{T_{1z}} = \left( \frac{p_{2z}}{p_{1z}} \right)^{\frac{\kappa_{zr}-1}{\kappa_{zr}}} \quad (3.1)$$

$$\eta_k = \frac{P_{s,k}}{P_k} = \frac{q_{m,z}(h_{2z,s} - h_{1z})}{q_{m,z}(h_{2z} - h_{1z})} = \frac{T_{2z,s} - T_{1z}}{T_{2z} - T_{1z}} \quad (3.2)$$

Iz (3.2) može se odrediti stvarna temperatura na kraju kompresije:

$$T_{2z} = T_{1z} + \frac{T_{2z,s} - T_{1z}}{\eta_k} \quad (3.3)$$

Snaga potrebna za pogon kompresora, tj. komprimiranje zraka određuje se prema [8]:

$$P_k = \frac{q_{m,z}(h_{2z} - h_{1z})}{10^3} \quad (3.4)$$

### 3.1.2. Komora izgaranja

Molarni sastav goriva (prirodnog plina) koje ulazi u komoru izgaranja prikazan je u tablici 3.1.

**Tablica 3.1: Molarni sastav prirodnog plina**

<b>Sudionik</b>	<b>Molarni (volumni) udio, <math>y_i</math></b>
CH <sub>4</sub>	0,9854
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0,0039
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	0,001
C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0,0003
CO <sub>2</sub>	0,0008
N <sub>2</sub>	0,0086

Molarna masa goriva izračunava se prema (3.5) [8]

$$M_g = \sum_{i=1}^k y_i M_i \quad (3.5)$$

Iz (3.6) određuje se molarni volumen goriva [8]

$$V_{m,g} = \frac{T_g R_m}{p_{ok,ISO} \cdot 10^2} \quad (3.6)$$

Gdje je  $p_{ok,ISO}$  tlak okolišnog zraka prema ISO standardnim uvjetima te iznosi 1,013 bar kod temperature goriva od 15 °C.

Gustoća goriva može se odrediti iz jednadžbe (3.7) [8]

$$\rho_g = \frac{M_g}{V_{m,g}} \quad (3.7)$$

Te slijedi donja ogrijevna vrijednost goriva u kJ/kg prema (3.8) [8]

$$H_d = \frac{H_{d,v}}{\rho_g} \cdot 10^3 \quad (3.8)$$

gdje je  $H_{d,v}$  donja ogrijevna vrijednost izmjerena laboratorijski te izražena po jedinici volumena, a iznosi 33,87 MJ/m<sup>3</sup>.

Proces izgaranja opisuje se stehiometrijskim jednadžbama izgaranja ugljikovodika sadržanih u prirodnom plinu [10]:



Ugljikov dioksid ( $\text{CO}_2$ ) i dušik ( $\text{N}_2$ ) iz goriva ne sudjeluju u procesu izgaranju, ali prolaze kroz komoru izgaranja i plinsku turbinu te izmjenjuju toplinski tok.

Nadalje se prema (3.13) određuje minimalna količina kisika ( $\text{m}^3$ ) potrebna za potpuno izgaranje 1 kg goriva [10]

$$V_{O_2, \min} = (2 \cdot y_{CH_4} + 3,5 \cdot y_{C_2H_6} + 5 \cdot y_{C_3H_8} + 6,5 \cdot y_{C_4H_{10}}) \cdot \frac{22,41}{M_g} \quad (3.13)$$

Minimalna potrebna količina zraka ( $\text{m}^3$ ) za potpuno izgaranje 1 kg goriva izračunava se prema (3.14) [10]

$$V_{z, \min} = \frac{V_{O_2, \min}}{0,21} \quad (3.14)$$

Stvarna količina zraka za izgaranje 1 kg goriva određuje se prema (3.15) i uvijek je veća od minimalne [10]. Izgaranje u plinskoj turbini odvija se sa značajnim pretičkom zraka, radi osiguravanja potpunog izgaranja, zaštite materijala od visokih temperature te snižavanja temperature izgaranja.

$$V_z = \lambda \cdot V_{z, \min} \quad (3.15)$$

Kako bi se odredila ukupna količina, tj. volumen nastalih dimnih plinova prilikom izgaranja 1 kg goriva, prvo je potrebno odrediti volumene produkata izgaranja nastalih izgaranjem 1 kg goriva. Količina ( $\text{m}^3$ )  $\text{CO}_2$  po 1 kg goriva u dimnim plinovima [10] izračunava se iz jednadžbe (3.16)

$$V_{CO_2} = (y_{CH_4} + 2 \cdot y_{C_2H_6} + 3 \cdot y_{C_3H_8} + 4 \cdot y_{C_4H_{10}} + y_{CO_2}) \cdot \frac{22,41}{M_g} \quad (3.16)$$

Minimalna količina ( $\text{m}^3$ ) dušika po 1 kg goriva koja prolazi kroz komore izgaranja, ali ne izgara određuje se prema (3.17) te sadrži dušik iz goriva i iz zraka za izgaranje [10]

$$V_{N_2, \min} = y_{N_2} \cdot \frac{22,41}{M_g} + 0,79 \cdot V_{z, \min} \quad (3.17)$$

Količina vodene pare po 1 kg goriva sadržane u dimnim plinovima izračunava se prema (3.18) [10]

$$V_{H_2O} = (2 \cdot y_{CH_4} + 3 \cdot y_{C_2H_6} + 4 \cdot y_{C_3H_8} + 5 \cdot y_{C_4H_{10}}) \cdot \frac{22,41}{M_g} \quad (3.18)$$

Ukupna količina dimnih plinova nastalih prilikom izgaranja 1 kg goriva određuje se prema (3.19) [10]

$$V_{dp} = V_{CO_2} + V_{N_{2,min}} + V_{H_2O} + (\lambda - 1)V_{z,min} \quad (3.19)$$

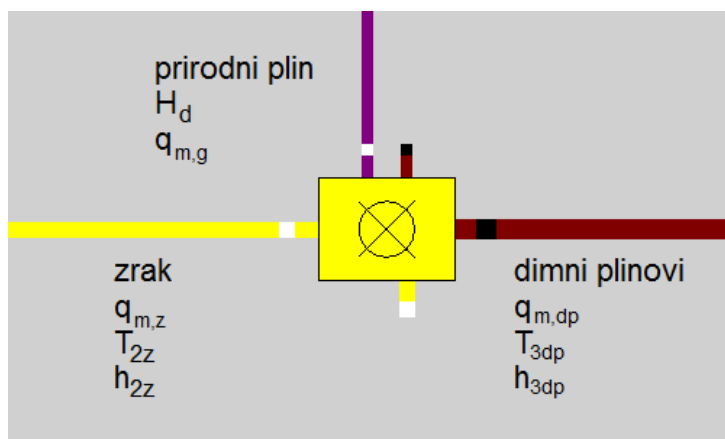
Gustoća dimnih plinova može se izračunati iz jednadžbe (3.20) [10]

$$\rho_{dp} = \frac{\left[ \frac{V_{CO_2}}{V_{dp}} M_{CO_2} + \frac{V_{N_{2,min}}}{V_{dp}} M_{N_{2,min}} + \frac{V_{H_2O}}{V_{dp}} M_{H_2O} + (\lambda - 1) \frac{V_{z,min}}{V_{dp}} M_z \right]}{22,41} \quad (3.20)$$

Iz jednadžbe (3.21) slijedi maseni protok dimnih plinova [10]

$$q_{m,dp} = q_{m,g} \cdot V_{dp} \cdot \rho_{dp} \quad (3.21)$$

U komori izgaranja dolazi do pretvorbe kemijske energije goriva u toplinsku energiju te se proces izgaranja odvija kod konstantnog tlaka. Shematski je komora izgaranja prikazana na slici (3.3).



**Slika 3.3: Komora izgaranja**

Iz slike 3.3 može se odrediti masena bilanca komore izgaranja [10]:

$$q_{m,dp} = q_{m,z} + q_{m,g} \quad (3.22)$$

Jednadžbom 3.23 prikazana je energetska bilanca komore izgaranja [10]

$$q_{m,dp} \cdot h_{3dp} = q_{m,z} \cdot h_{2,z} + q_{m,g} \cdot H_d \quad (3.23)$$

Iz (3.23) slijedi specifična entalpija dimnih plinova na izlazu iz komore izgaranja te na ulazu u plinsku turbinu:

$$h_{3dp} = \frac{q_{m,z} \cdot h_{2,z} + q_{m,g} \cdot H_d}{q_{m,dp}} \quad (3.24)$$

### 3.1.3. Plinska turbina

U plinskoj turbini dimni plinovi ekspandiraju do okolišnog tlaka pa je omjer tlakova ekspanzije u plinskoj turbini jednak kompresijskom omjeru kompresora:

$$\frac{p_{3dp}}{p_{4dp}} = \frac{p_{2z}}{p_{1z}} = \varepsilon_k \quad (3.25)$$

Idealna ekspanzija, bez gubitaka, bila bi izentropska te je kod nje odnos veličina stanja [8]

$$\frac{T_{3dp}}{T_{4dp,s}} = \left( \frac{p_{3dp}}{p_{4dp}} \right)^{\frac{\kappa_{dp}-1}{\kappa_{dp}}} \quad (3.26)$$

U stvarnosti postoje gubici, te se ekspanzija odvija politropski. Iz jednadžbe (3.27) za stupanj djelovanja turbine [9]

$$\eta_t = \frac{T_{3dp} - T_{4dp}}{T_{3dp} - T_{4dp,s}} \quad (3.27)$$

može se odrediti stvarna temperatura dimnih plinova na izlazu iz plinske turbine:

$$T_{4dp} = T_{3dp} - \eta_t \cdot (T_{3dp} - T_{4dp,s}) \quad (3.28)$$

Snaga plinske turbine računa se prema (3.29) [8]

$$P_{pl,t} = \frac{q_{m,dp} \cdot (h_{3dp} - h_{4dp})}{10^3} \quad (3.29)$$

Snaga potrebna za pogon kompresora dobiva se od plinske turbine pa je stvarna snaga plinsko-turbinskog postrojenja [8]

$$P_{PT} = P_{pl,t} - P_k \quad (3.30)$$

Uzimajući u obzir mehaničke i električne gubitke može se odrediti snaga na električnom generatoru plinske turbine

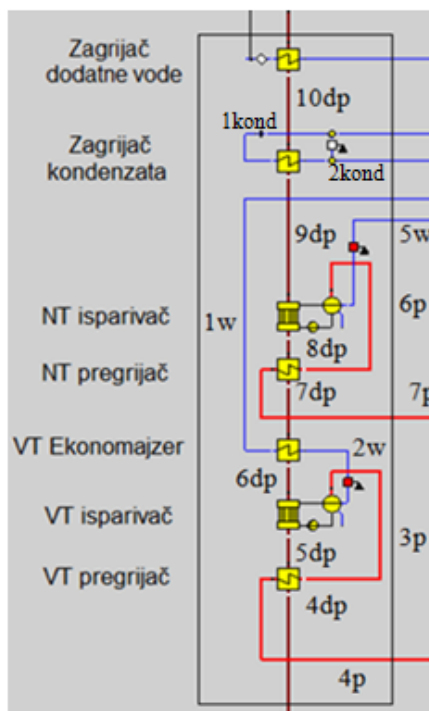
$$P_{el,PT} = P_{PT} \cdot \eta_{el} \cdot \eta_{meh,PT} \quad (3.31)$$

Električni stupanj djelovanja (iskoristivost) plinsko-turbinskog dijela izračunava se prema (3.32) [8]

$$\eta_{el,PT} = \frac{P_{el,PT} \cdot 10^3}{q_{m,g} \cdot H_d} \quad (3.32)$$

### 3.2. Termodinamički proračun kotla na ispušne plinove

Dimni se plinovi nakon ekspanzije u plinskoj turbini odводе u generator pare na ispušne (HRSG) koji se sastoji od niza izmjenjivača (pregrijači, ekonomajzer) i dva isparivača (slika 3.4).



Slika 3.4: Shema kotla na ispušne plinove

U VT pregrijaču povećava se toplinsko stanje visokotlačne pare koja je proizvedena u VT isparivaču zagrijavanjem i isparivanjem napojne vode prethodno zagrijane u VT ekonomajzeru.

Toplinski tok koji dimni plinovi predaju pari koja se pregrijava na VT pregrijaču tj. toplinska bilanca prikazana je jednadžbom (3.33) [8,10]

$$\begin{aligned} \Phi_{VT,pr} &= q_{m,dp}(h_{4dp} - h_{5dp}) = q_{m,pVT}(h_{4p} - h_{3p}) \\ &= k_{VT,pr} \cdot A_{VT,pr} \cdot \Delta T_{m,VT,pr} \end{aligned} \quad (3.33)$$

Izmjenjeni toplinski tok na VT isparivaču određuje se prema (3.34) [8,10]

$$\begin{aligned}\Phi_{VT,isp} &= q_{m,dp}(h_{5dp} - h_{6dp}) = q_{m,pVT}(h_{3p} - h_{2w}) \\ &= k_{VT,isp} \cdot A_{VT,isp} \cdot \Delta T_{m,VT,isp}\end{aligned}\quad (3.34)$$

Izmjenjeni toplinski tok na VT ekonomajzeru [8,10]:

$$\begin{aligned}\Phi_{VT,eko} &= q_{m,dp}(h_{6dp} - h_{7dp}) = q_{m,pVT}(h_{2w} - h_{1w}) \\ &= k_{VT,eko} \cdot A_{VT,eko} \cdot \Delta T_{m,VT,eko}\end{aligned}\quad (3.35)$$

Nakon VT ekonomajzera dimni plinovi prolaze kroz NT pregrijač, a potom kroz NT isparivač.

Toplinski tok izmjenjen na NT pregrijaču [8,10]:

$$\begin{aligned}\Phi_{NT,pr} &= q_{m,dp}(h_{7dp} - h_{8dp}) = q_{m,pNT}(h_{7p} - h_{6p}) \\ &= k_{NT,pr} \cdot A_{NT,pr} \cdot \Delta T_{m,NT,pr}\end{aligned}\quad (3.36)$$

Toplinski tok izmjenjen na NT isparivaču [8,10]:

$$\begin{aligned}\Phi_{NT,isp} &= q_{m,dp}(h_{8dp} - h_{9dp}) = q_{m,pNT}(h_{6p} - h_{5w}) \\ &= k_{NT,isp} \cdot A_{NT,isp} \cdot \Delta T_{m,NT,isp}\end{aligned}\quad (3.37)$$

U zagrijaču kondenzata zagrijava se kondenzat iz kondenzatora prije ulaza u otplinjač.

Toplinski tok koji se predaje kondenzatu određuje se prema (3.38) [8,10]

$$\begin{aligned}\Phi_{zagr,kond} &= q_{m,dp}(h_{9dp} - h_{10dp}) = q_{m,kond}(h_{2kond} - h_{1kond}) \\ &= k_{zagr,kond} \cdot A_{zagr,kond} \cdot \Delta T_{m,zagr,kond}\end{aligned}\quad (3.38)$$

Srednja logaritamska razlika temperatura ( $\Delta T$ ) izračunava se prema [10]

$$\Delta T_m = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)}\quad (3.39)$$

gdje su:

$$\Delta T_1 = T_{dp,u} - T_{p(w),i}\quad (3.40)$$

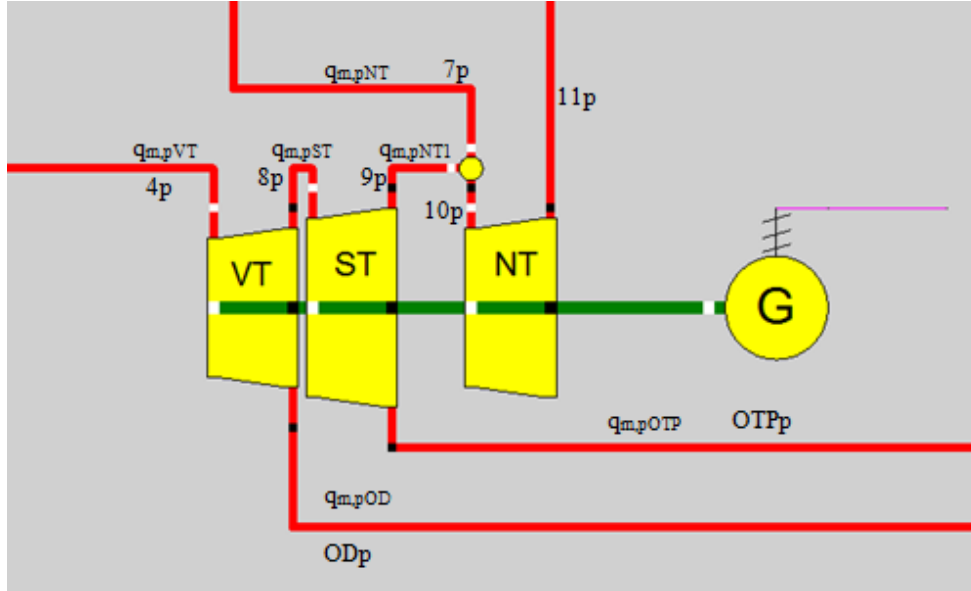
$$\Delta T_2 = T_{dp,i} - T_{p(w),u}\quad (3.41)$$

### 3.3. Termodinamički proračun parne turbine

Parno-turbinski dio sastoji se od visokotlačnog, srednjetačnog i niskotlačnog dijela turbine i električnog generatora (slika 3.5). Na tlaku od 16 bar je jedno neregulirano oduzimanje



procesne pare za potrebe CTS-a. U niskotlačni dio turbine ulazi para niskog tlaka koja se miješa s parom iz ST dijela, a dio pare niskog tlaka iz ST stupnja odvodi se u otplinjač. Na izlazu iz posljednjeg stupnja parne turbine para se odvodi u vodom hlađeni kondenzator. Nastali kondenzat se potom zagrijava u zagrijaču kondenzata u generatoru pare te tako zagrijan ulazi u otplinjač.



Slika 3.5: Parno-turbinski dio

Snaga VT stupnja turbine računa se prema (3.42) [8]

$$P_{VT} = \frac{q_{m,pVT} \cdot (h_{4p} - h_{8p})}{10^3} \quad (3.42)$$

Na izlazu iz VT stupnja dio pare se oduzima ( $q_{m,pOD}$ ) za potrebe CTS-a grada Siska. Parametri oduzimanja su tlak od 16 bar i temperatura pare od 300 °C. Ostatak pare prolazi kroz ST stupanj te se njegova snaga određuje prema (3.43) [8]

$$P_{ST} = \frac{q_{m,pST} \cdot (h_{8p} - h_{9p})}{10^3} = \frac{(q_{m,pVT} - q_{m,pOD}) \cdot (h_{8p} - h_{9p})}{10^3} \quad (3.43)$$

U NT stupanj ulazi para iz NT isparivača, koja se miješa s dijelom pare iz ST stupnja ( $q_{m,pNT1}$ ) dok se ostatak ST pare odvodi u otplinjač ( $q_{m,pOTP}$ ). Iz bilance mješališta može se odrediti entalpija niskotlačne pare na ulazu u NT stupanj [8]:

$$q_{m,pNT1} \cdot h_{9p} + q_{m,pNT} \cdot h_{7p} = (q_{m,pNT} + q_{m,pNT1}) \cdot h_{10p} \quad (3.44)$$

$$h_{10p} = \frac{q_{m,pNT1} \cdot h_{9p} + q_{m,pNT} \cdot h_{7p}}{(q_{m,pNT} + q_{m,pNT1})} \quad (3.45)$$

gdje je

$$q_{m,pNT1} = (q_{m,pST} - q_{m,pOTP}) \quad (3.46)$$

Snaga NT stupnja izračunava se prema (3.47) [8]

$$P_{NT} = \frac{(q_{m,pNT} + q_{m,pNT1}) \cdot (h_{10p} - h_{11p})}{10^3} \quad (3.47)$$

Ukupna snaga na generatoru parne turbine s uključenim gubicima:

$$P_{el,PAT} = (P_{VT} + P_{ST} + P_{NT}) \cdot \eta_{el} \cdot \eta_{meh,PAT} \quad (3.48)$$

Električni stupanj iskoristivosti kombiniranog postrojenja izračunava se prema (3.49) [2]

$$\eta_{el,uk} = \frac{(P_{el,PT} + P_{el,PAT}) \cdot 10^3}{q_{m,g} \cdot H_d} \quad (3.49)$$

Ukupni stupanj iskoristivosti kombiniranog kogeneracijskog postrojenja [2]:

$$\eta_{uk} = \frac{(P_{el,PT} + P_{el,PAT} + Q_T) \cdot 10^3}{q_{m,g} \cdot H_d} = \frac{(P_{el,uk} + Q_T) \cdot 10^3}{q_{m,g} \cdot H_d} \quad (3.50)$$

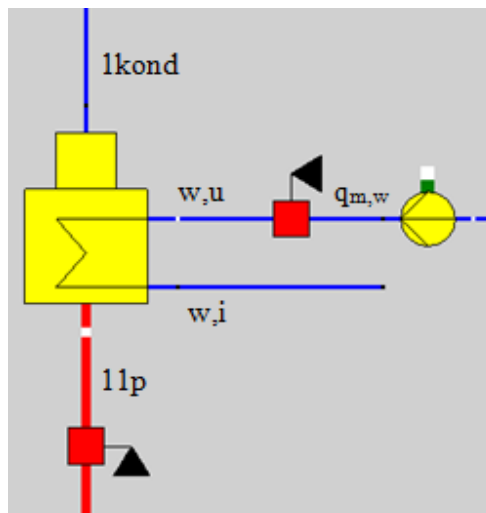
gdje je  $Q_T$  toplinska snaga grijanja, a  $P_{el,uk}$  ukupna električna snaga.

Toplinski tok izmjenjen na kondenzatoru (slika 3.6) [8]:

$$\Phi_{kond} = q_{m,kond} \cdot (h_{11p} - h_{1kond}) = q_{m,w} \cdot (h_{w,i} - h_{w,u}) \quad (3.51)$$

gdje je

$$q_{m,kond} = (q_{m,pNT} + q_{m,pNT1}) \quad (3.52)$$



Slika 3.6: Shema kondenzatora

### 3.4. EBSILON Professional

EBSILON Professional programski je paket koji se koristi za modeliranje, simulaciju i optimizaciju termodinamičkih procesa u postojećim postrojenjima te prilikom projektiranja i planiranja novih postrojenja. Program razvija STEAG grupa, jedna od najvećih njemačkih kompanija u području izgradnje termoelektričnih postrojenja i opskrbe energijom. Program omogućuje izradu shema, simuliranje i optimizaciju rada različitih postrojenja, npr. rashladni sustavi, termoelektrična postrojenja: parno-turbinska postrojenja, plinsko-turbinska postrojenja, kombi postrojenja, kogeneracijska postrojenja, solarne termoelektre.

EBSILON Professional ima grafičko sučelje koje omogućava simbolični prikaz elemenata tj. komponenti termoelektričnih postrojenja. Svaki od elemenata sastoji se od različitih naredbi, funkcija i jednažbi koje na temelju ulaznih vrijednosti i zakona o očuvanju mase i energije, proračunavaju izlazne vrijednosti.

Komponente se međusobno povezuju linijama ovisno o tipu medija. U programu postoji i širok izbor armature, regulacijskih i pomoćnih elemenata, koji se koriste za postavljanje i regulaciju traženih parametara.

Nakon pravilno postavljenog i povezanog sustava u kojem su definirani početni uvjeti slijedi simulacija koja se temelji na iterativnom postupku. Na temelju osnovnih jednažbi za svaki element, zadanih početnih uvjeta i podataka o radnim medijima dostupnih unutar programa, pokretanjem simulacije započinje iterativni postupak. U svakom koraku iteracije, rješenja karakterističnih jednažbi zapisuju se u matričnom obliku te se dobiva matrični zapis linearnog sustava karakterističnih jednažbi. Konačno rješenje sustava program određuje primjenom implicitne Gauss-Seidel metode.

Osim operacija koje program izvršava automatski, postoji mogućnost definiranja dodatnih operacija korištenjem vlastitog programskog koda u programskom jeziku EbsScript koji je baziran na programskom jeziku PASCAL-u.

Podaci o radnim medijima integrirani u programski alat su:

- tablice za vodenu paru IAPWS-97 i IFC-67
- FDBR, VDI 4670 i NASA tablice za idealne plinove
- tablice dvofaznih medija – REFPROP

EBSILON Professional omogućuje i prikaz rezultata simulacije. Rezultati se mogu prikazati u različitim dijagramima ( $T, q$  – dijagram,  $h, s$  – dijagram,  $T, s$  – dijagram, itd.) i tablično.

Program je kompatibilan s drugim programskim paketima, poput MATLAB-a i MS Excel-a [11,12,13].

#### **3.4.1. Design mode i Off-design mode**

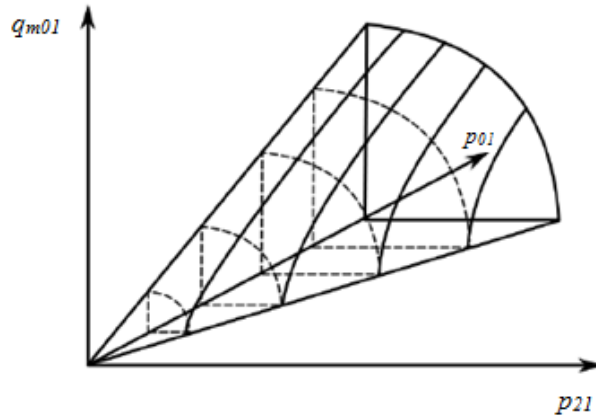
U EBSILON Professional-u moguće je računanje i simuliranje u dva globalna načina rada, design mode i off-design mode. Design mode podrazumijeva proračun sustava uz pretpostavku punog opterećenja (100%). Vrijednosti dobivene na kraju simulacije u design mode-u spremaju se unutar komponenti kao nominalne vrijednosti te se koriste kao referentne vrijednosti za proračun unutar off-design mode-a.

U off-design mode-u moguć je proračun sustava koji je djelomično opterećen (npr. 70% punog opterećenja). Za ovaj način rada potrebno je napraviti novi profil unutar postojeće simulacije te je raspored komponenti i njihovo međudjelovanje jednako kao u design mode-u. Vrijednosti koje ostaju nepromijenjene u odnosu na design mode izravno se preuzimaju, dok se ostale vrijednosti računaju iterativno, na temelju njihovih referentnih vrijednosti u design mode-u [11,12,13].

#### **3.4.2. Stodolin zakon [14,15]**

Kod proračuna djelomičnog opterećenja (off-design) turbine u Ebsilon-u tlak na ulazu u turbinu određuje se iz nominalne vrijednosti tlaka kod punog opterećenja, na temelju Stodolinog zakona. Stodolin zakon ime je dobio prema slovačkom inženjeru Aurelu Stodoli (1859.-1942.), koji je proučavao odnos protoka pare kroz stupnjeve parne turbine i tlaka oduzimanja pare. Stodolin zakon konusa ili zakon elipse definira nelinearan odnos promjene protoka pare, u ovisnosti o nekom protutlaku oduzimanja pare na turbini. Stodolin zakon konusa je temelj kod proračuna višestupanjske turbine pri djelomičnom opterećenju ili prilikom promjene masenog protoka oduzimanja.

Pri punom (nazivnom) opterećenju turbine, proračun se provodi kod nazivnog masenog protoka  $q_{m0}$ , uz temperaturu  $T_0$  i tlak  $p_0$  na ulazu u turbinu te tlak oduzimanja pare  $p_2$ . Pri djelomičnom opterećenju maseni protok  $q_{m01}$  razlikuje se od nazivnog, isto kao i temperatura  $T_{01}$  i tlak  $p_{01}$  na ulazu u turbinu i tlak oduzimanja  $p_{21}$ . Odnos navedenih veličina može se prikazati konusom u Kartezijevom koordinatnom sustavu (slika 3.7). Slika prikazuje vezu između protoka  $q_{m01}$  i tlaka  $p_{21}$  pri smanjenom opterećenju, a kod konstantnog tlaka  $p_{01}$  na ulazu u turbinu. Ta je veza određena lukom elipse u ravnini paralelnoj s osima  $q_{m01}$  i  $p_{21}$ .



Slika 3.7: Stodolin konus [14]

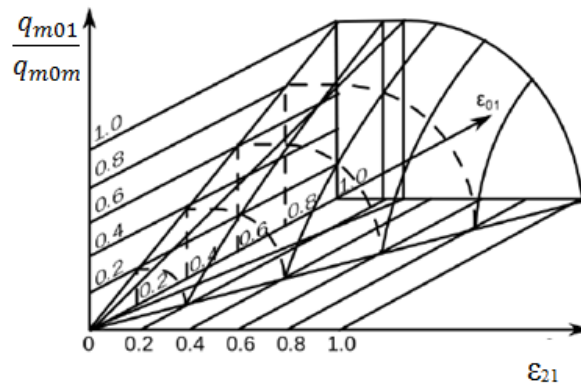
Ukoliko se na koordinatne osi unesu omjeri protoka tj. tlakova kod djelomičnog i maksimalnog opterećenja dobiva se konus prikazan slikom 3.8. Omjeri tlakova zapisuju se pomoću sljedećih izraza [14]:

$$\varepsilon_0 = \frac{p_0}{p_{0m}} \quad (3.53)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{p_2}{p_{2m}} \quad (3.54)$$

$$\varepsilon_{01} = \frac{p_{01}}{p_{0m}} \quad (3.55)$$

$$\varepsilon_{21} = \frac{p_{21}}{p_{2m}} \quad (3.56)$$



Slika 3.8: Omjer vrijednosti na osima [14]

Stodolin konus sa slike (3.8) može se formulirati analitički [14]:

$$\frac{q_{m0}}{q_{m01}} = \sqrt{\frac{T_{01}}{T_0}} \sqrt{\frac{\varepsilon_0^2 - \varepsilon_2^2}{\varepsilon_{01}^2 - \varepsilon_{21}^2}} \quad (3.57)$$

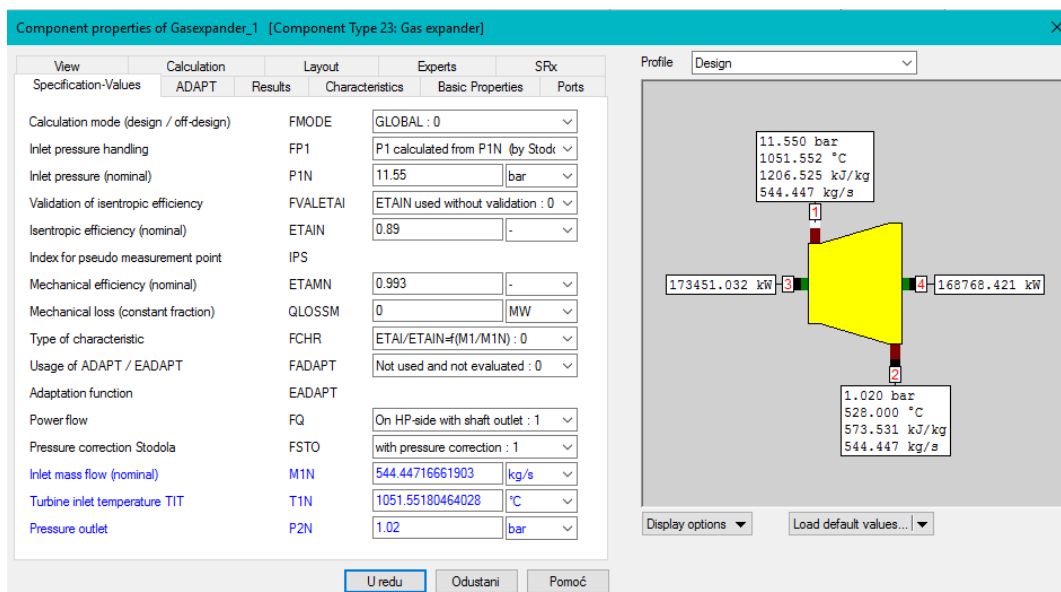
Navedena relacija predstavlja odnos između protoka kroz turbinu pri punom i djelomičnom opterećenju. Koristi se u programskom alatu EBSILON Professional za određivanje tlakova na ulazu u turbinu i tlakova odvođenja pri smanjenom protoku tj. opterećenju.

### 3.5. Postavke modela postojećeg postrojenja

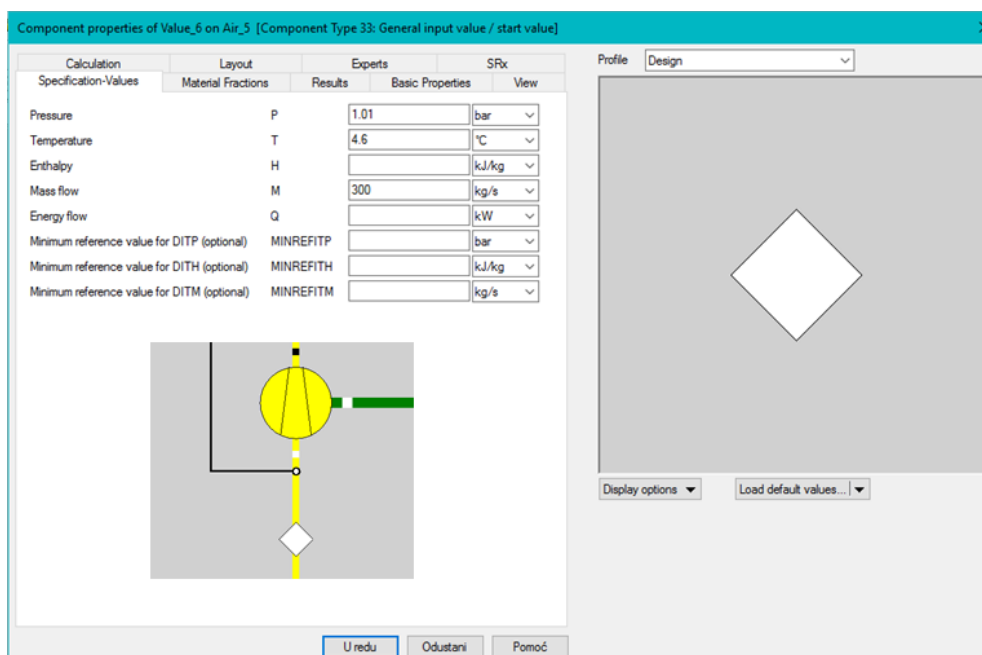
U tablici 3.2 prikazane su nominalne vrijednosti korištene kod izrade modela postojećeg kombiniranog kogeneracijskog postrojenja pri punom opterećenju. Navedene vrijednosti unose se u model unutar pojedinih komponenti (slika 3.9) ili kao izmjerene tj. ulazne vrijednosti na liniji radnog medija (3.10). Slika 3.9 prikazuje svojstva komponente plinske turbine te se može uočiti da je nominalni tlak na ulazu u plinsku turbinu, ujedno i tlak na izlazu iz kompresora plinske turbine, definiran za puno opterećenje, dok se tlak kod djelomičnog opterećenja računa prema Stodolinom zakonu.

**Tablica 3.2: Nominalne vrijednosti kod punog opterećenja**

relativna vlažnost zraka, [%]	60
temperatura zraka na ulazu u kompresor, [°C]	4,6
tlak zraka na usisu u kompresor, [bar]	1,01
tlak zraka na izlazu iz kompresora plinske turbine, [bar]	11,55
temperatura na izlazu iz plinske turbine, [°C]	528
tlak na izlazu iz plinske turbine, [bar]	1,02
snaga na generatoru plinske turbine, [MW]	160,33
tlak pare u VT bubnju, [bar]	72
tlak pare u NT bubnju, [bar]	8,5
tlak na ulazu u VT stupanj parne turbine, [bar]	68
tlak na ulazu u NT stupanj parne turbine, [bar]	6
tlak pare oduzimanja, [bar]	16
tlak u kondenzatoru, [bar]	0,022
tlak nakon kondezacijske pumpe, [bar]	15
protok rashladne vode za hlađenje kondenzatora, [t/h]	15000



Slika 3.9: Svojstva komponente plinske turbine



Slika 3.10: Definiranje vrijednosti na liniji radnog medija

Na temelju poznatih podataka o molnim udjelima sudionika u gorivu određuje se donja ogrjevna vrijednost goriva (NCV) te je u Ebsilon-u dobivena vrijednost 49530,0677 kJ/kg.

Potrebni maseni protok goriva i zraka za izgaranje određeni su u Ebsilon-u pomoću komponente kontrolera (slika 3.11). U rubrici *Target value type* definira se željeni parametar (ulazna, zadana vrijednost), u ovom slučaju je to snaga na generatoru plinske turbine, a u rubrici *Target value* unosi se vrijednost snage. Rubrikom *Corrected variable type* određuju se

parametar koji će se korigirati kako bi se dobila tražena snaga, u ovom slučaju je to maseni protok (izlazna vrijednost). Na korigiranu vrijednost mogu se postaviti ograničenja tj. minimalna i maksimalna vrijednost. Važno je postaviti i početnu vrijednost na temelju koje će kontroler odrediti korigiranu vrijednost. Karakteristika kontrolera može biti pozitivna i negativna, te će kod pozitivne karakteristike promjenom željene vrijednosti korigirana vrijednost rasti, a kod negativne padati. Rad kontrolera opisuje se sljedećim izrazima [13]:

relativna razlika zadane i stvarne ulazne vrijednosti

$$S_i = \frac{\text{zadana} - \text{stvarna}}{\text{zadana}} \quad (3.58)$$

relativna promjena korigirane vrijednosti

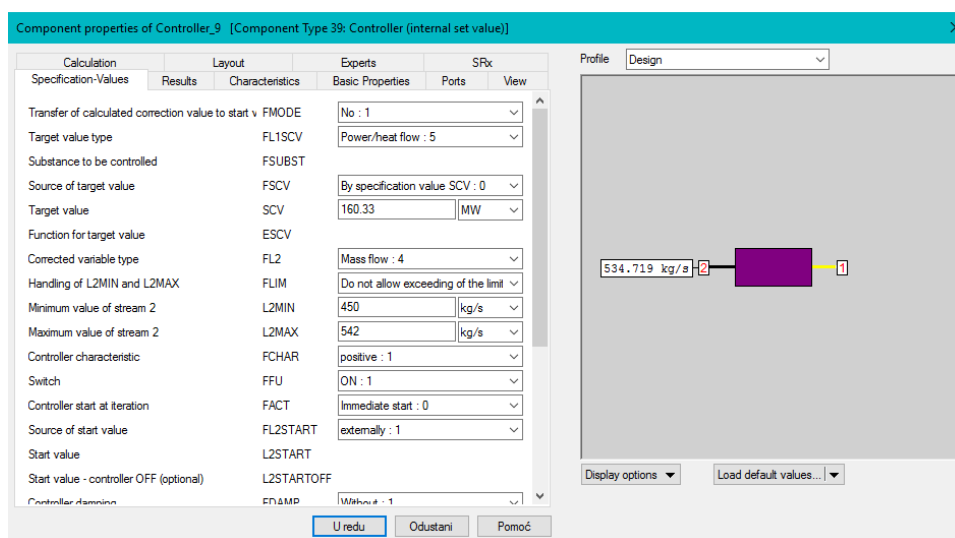
$$K_i = \frac{f_{\text{novo}} - f_{\text{staro}}}{f_{\text{staro}}} \quad (3.59)$$

gradijent promjene

$$G_i = \frac{K_i}{S_i} \quad (3.60)$$

Kontroler uzima najbolju moguću promjenu korigirane vrijednosti iz sljedećeg iteracijskog koraka, a za to koristi gradijent promjene. Gradijent promjene omjer je relativne promjene korigirane vrijednosti i relativne razlike zadane i stvarne vrijednosti. Za određivanje nove korigirane vrijednosti koristi se gradijent izračunat u zadnja dva koraka iteracije, korigirana vrijednost iz prethodne iteracije ( $f_{\text{staro}}$ ) i početna vrijednost ( $f$ ):

$$f_{\text{novo}} = f_{\text{staro}} \cdot (1 + f \cdot G_i \cdot S_i) \quad (3.61)$$



Slika 3.11: Svojstva komponente kontrolera



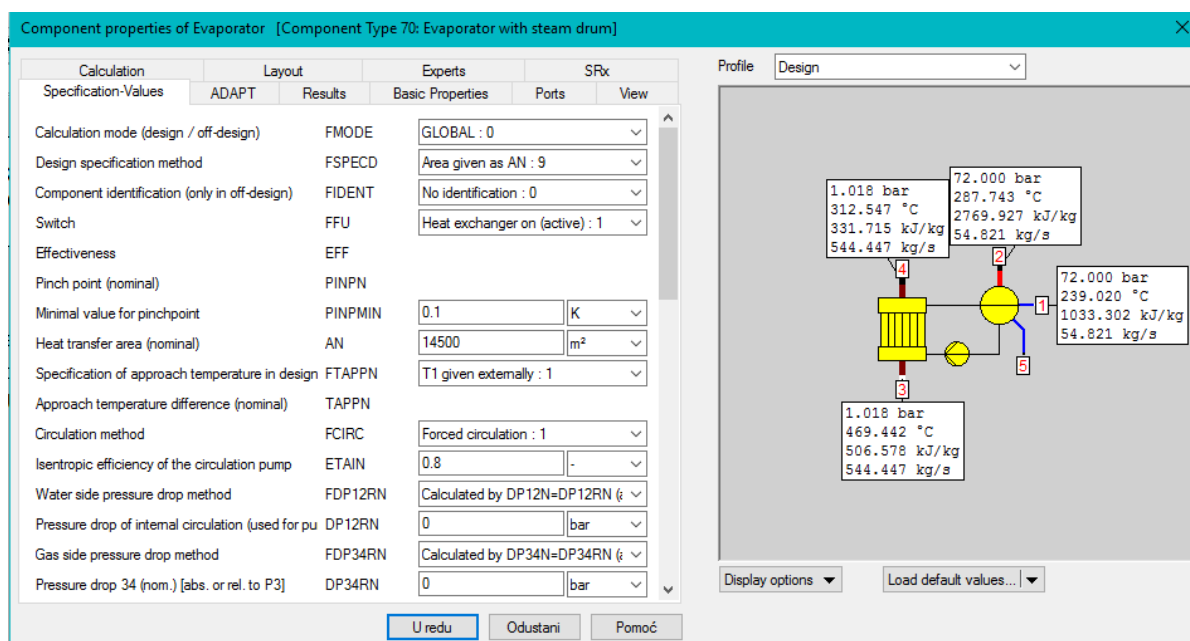
Izmjenjivači topline u kotlu na ispušne plinove iz plinske turbine definirani su preko površina za izmjenu topline (tablica 3.3), a strujanje je protustrujno u svim izmjenjivačima.

**Tablica 3.3: Izmjenjivači topline u kotlu na ispušne plinove**

	površina [m <sup>2</sup> ]
zagrijač kondenzata	10000
NT isparivač	8000
NT pregrijač	375
VT ekonomajzer	4500
VT isparivač	14500
VT pregrijač	6100

Slikom 3.12 prikazana su neka svojstva komponente VT isparivača te se vide parametri pare i vode (hladna strana) i dimnih plinova (topla strana). U program se unose nominalne vrijednosti koeficijenta prijelaza topline za hladnu ( $\alpha_{12N}$ ) i toplu stranu ( $\alpha_{34N}$ ) te se iz njih određuje nominalni koeficijent prolaza topline prema:

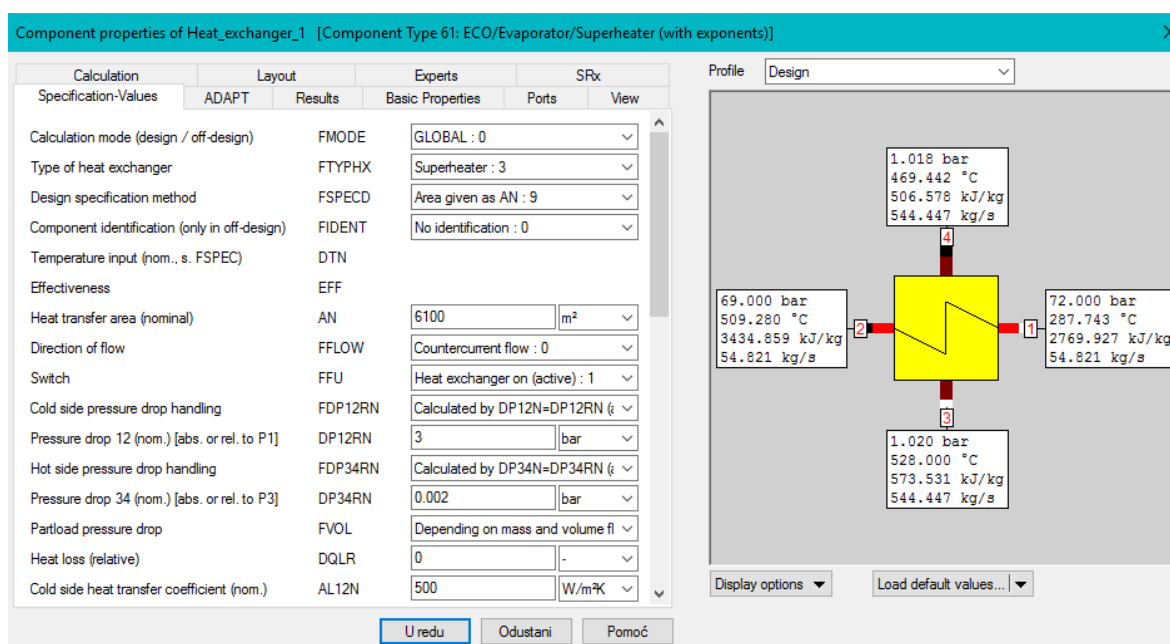
$$k_N = \frac{1}{\alpha_{12N}} + \frac{1}{\alpha_{34N}} \quad (3.62)$$



**Slika 3.12: Svojstva komponente VT isparivača**

Važno svojstvo isparivača je tzv. pristupna temperatura (eng. *approach temperature*). Ona je definirana kao temperaturna razlika između temperature vode na ulazu u isparivač i temperature zasićenja pare. Proizvodnja pare je veća kod manjih pristupnih temperatura. Temperatura vode na ulazu u isparivač zadana je izvan komponente isparivača, te se određuje kao temperatura kapljevine za tlak zasićenja od 6 bar u otplinjaču. Temperatura pare na izlazu iz isparivača jednaka je temperaturi zasićenja pare za tlak u bubnju isparivača. Program izračunava gornju i donju temperaturnu razliku, izmjenjeni toplinski tok i druge parametre.

Na slici 3.13 prikazana su neka svojstva VT pregrijača, te se na sličan način definira i NT pregrijač, VT ekonomajzer i zagrijač kondenzata.



Slika 3.13: Svojstva komponente VT pregrijača

## 4. REZULTATI ZA POSTOJEĆE POSTROJENJE

Prikazat će se utjecaj promjene okolišnih uvjeta i režim rada pri djelomičnom opterećenju. Simulirat će se rad postrojenja za zimsko, ljetno i prijelazno razdoblje. Kako bi se detaljnije prikazao utjecaj pojedinog okolišnog parametra analizirat će se i zaseban utjecaj promjene tlaka, temperature i relativne vlažnosti na rad postrojenja.

### 4.1. Rad postrojenja za zimsko, prijelazno i ljetno razdoblje

Kod analiziranja rada postrojenja za različita razdoblja važno je znati stvarne vremenske uvjete na lokaciji. U tablici 4.1 dani su podaci o srednjim vrijednostima temperature, tlaka i relativne vlažnosti zraka u gradu Sisku [16,17]. Za zimsko razdoblje odabrane su vrijednosti u mjesecu siječnju, za prijelazno vrijednosti u mjesecu travnju, a za ljetno vrijednosti u mjesecu srpnju.

**Tablica 4.1: Srednje vrijednosti temperature, tlaka i relativne vlažnosti zraka u gradu Sisku**

	<b>Siječanj</b>	<b>Travanj</b>	<b>Srpanj</b>
Temperatura [°C]	0,1	11,5	21,5
Tlak [bar]	1,017	1,013	1,016
Relativna vlažnost [%]	77	70	65

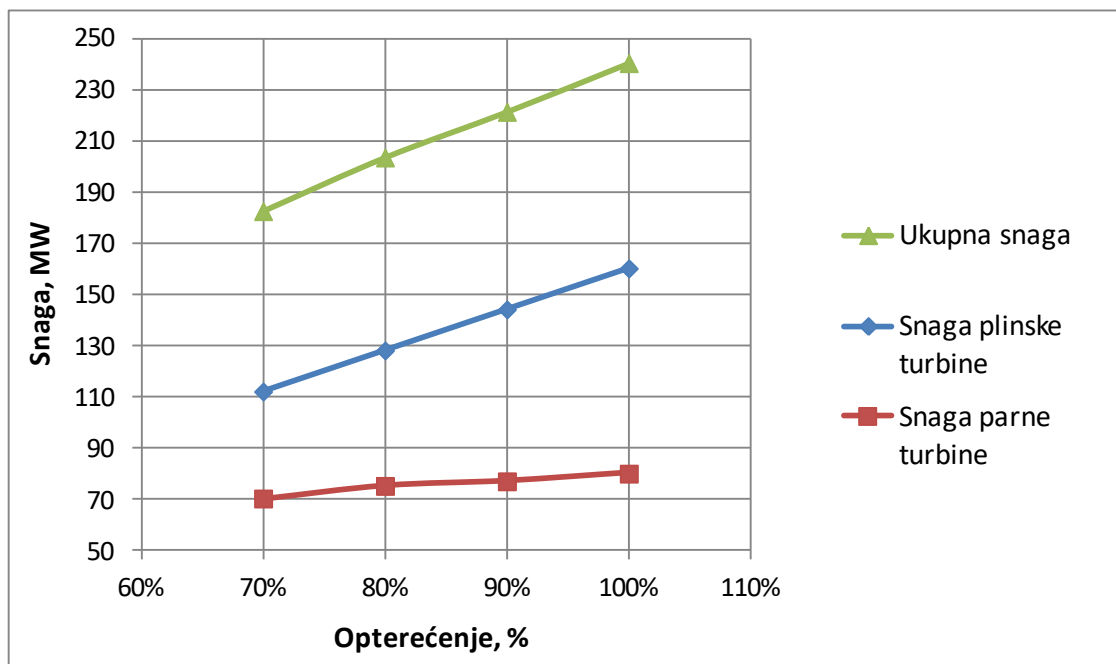
Rezultate dobivene za srednje vrijednosti prikazuje tablica 4.2. Može se uočiti da u siječnju kod punog opterećenja postrojenje postiže najveći ukupni stupanj iskoristivosti. Ukupni stupanj iskoristivosti je najveći jer postrojenje uz električnu proizvodi i toplinsku energiju, te je u zimskom razdoblju veći za 7,2% u odnosu na ljetno razdoblje.

Tablica 4.2: Rad postrojenja za različita razdoblja

	Siječanj	Siječanj (70% opt.)	Travanj	Srpanj
$q_{m,g}$ [kg/s]	9,91	8,571	9,458	9,128
$P_{el,PT}$ [MW <sub>e</sub> ]	164,746	115,322	153,928	144,804
$\eta_{el,PT}$ [%]	33,56	28,33	32,86	32,03
$P_{el,PAT}$ [MW <sub>e</sub> ]	65,061	58,486	79,848	80,41
$P_{el,uk}$ [MW <sub>e</sub> ]	229,807	173,808	233,776	225,214
$\eta_{el,uk}$ [%]	46,82	42,69	49,9	49,81
$Q_T$ [MW <sub>t</sub> ]	50	50	0	0
$\eta_{uk}$ [%]	57,01	54,97	49,9	49,81

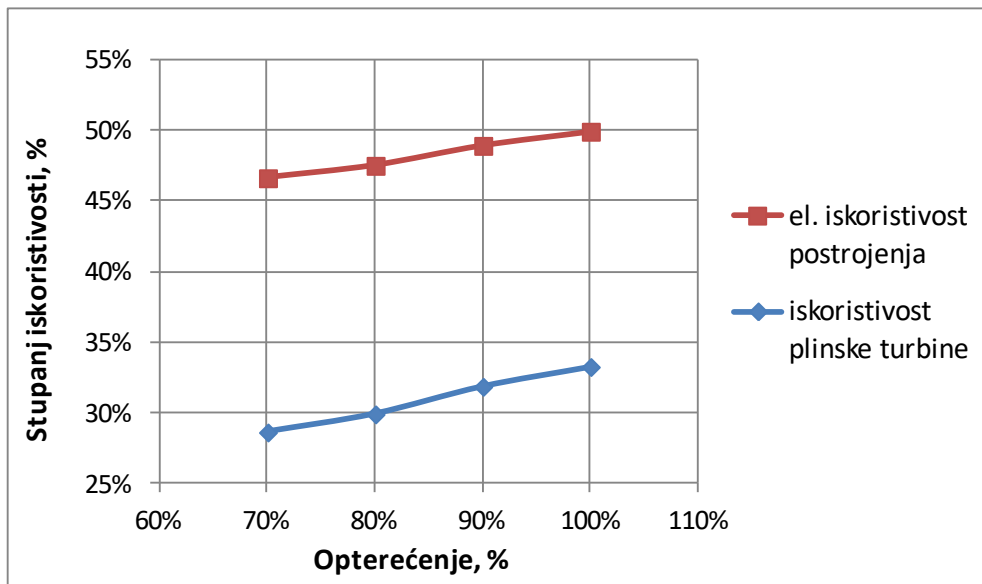
#### 4.2. Promjena opterećenja

Na slikama 4.1, 4.2 i 4.3 prikazani su rezultati dobiveni promjenom opterećenja plinske turbine uz konstantne parametre zraka na ulazu u kompresor i bez oduzimanja pare. Slikom 4.1 prikazana je promjena električne snage na generatoru plinske turbine, parne turbine i ukupne snage izazvana promjenom opterećenja plinske turbine, te porastom opterećenja rastu i snage. Ukupna je snaga kod 100% opterećenja veća za 57,813 MW u odnosu na ukupnu snagu kod 70% opterećenja.



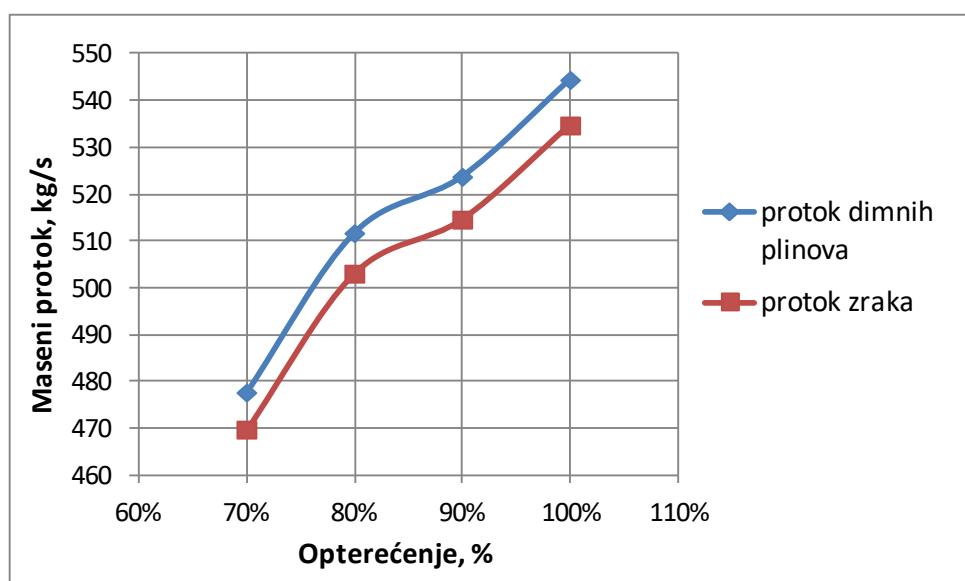
Slika 4.1: Ovisnost snaga o opterećenju

Na slici 4.2 prikazana je ovisnost stupnja iskoristivosti plinsko-turbinskog dijela i stupnja iskoristivosti kombiniranog postrojenja za proizvedenu električnu energiju o promjeni opterećenja, te isto kao i kod snaga, iskoristivosti rastu porastom opterećenja.



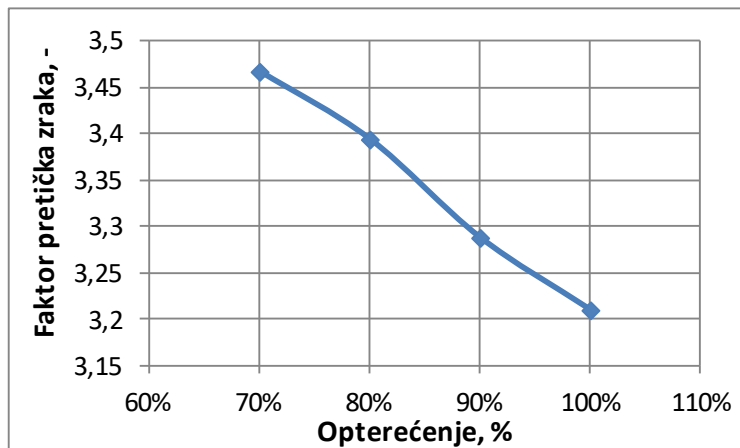
**Slika 4.2: Ovisnost iskoristivosti o opterećenju**

Ovisnost protoka zraka i protoka dimnih plinova o opterećenju prikazuje slika 4.3. Može se uočiti porast protoka povećanjem opterećenja, a protok dimnih plinova jednak je zbroju protoka goriva i protoka zraka te su krivulje protoka slične. U navedenom slučaju maksimalni iznos protoka dimnih plinova kroz plinsku turbinu kod punog opterećenja iznosi 544,447 kg/s, a pri opterećenju od 70% postiže se minimalna vrijednost od 477,653 kg/s.



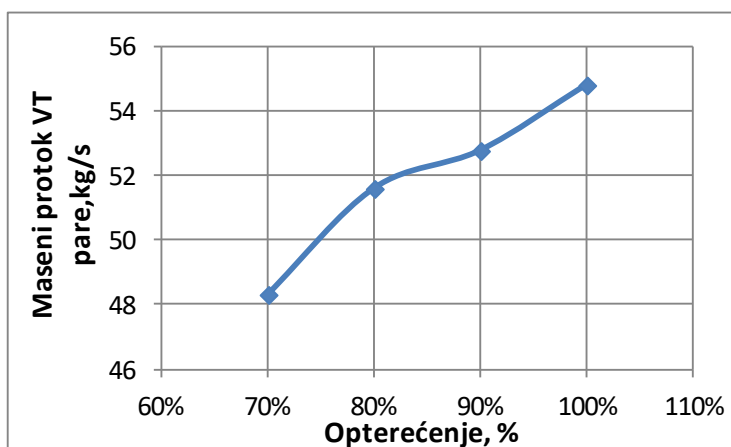
**Slika 4.3: Ovisnost masenog protoka o opterećenju**

Na slici 4.4 prikazana je ovisnost faktora pretička zraka o opterećenju te se porastom opterećenja on smanjuje, a kreće se u rasponu od 3,21 (100% opterećenja) do 3,47 (70% opterećenja).

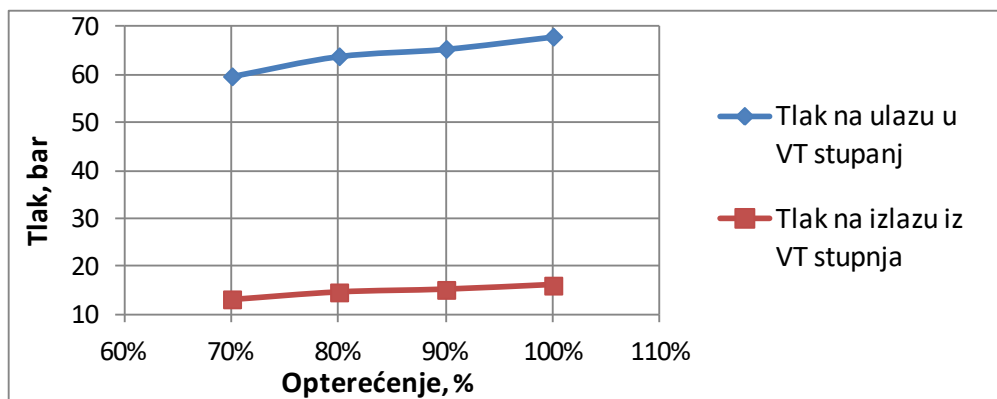


Slika 4.4: Ovisnost faktora pretička zraka o opterećenju

Promjena tlaka zraka u VT turbinskom stupnju pri djelomičnom opterećenju odvija se prema prije opisanom Stodolinom zakonu, ta promjena prikazana je slikom 4.6, a odnosi se na proces s oduzimanjem pare. Važno je naglasiti da dolazi do promjene tlaka na ulazu, ali i tlaka na izlazu iz VT turbinskog stupnja koji je jednak tlaku oduzimanja pare (pri 100% opterećenja iznosi 16 bar). Tlak na izlazu VT turbinskog stupnja jednak je tlaku na ulazu u ST turbinski stupanj, a komponenta ST turbinskog stupnja isto je definirana tako da se tlak na ulazu određuje prema Stodolinom zakonu. Kao što je spomenuto tlakovi se mijenjaju u ovisnosti o masenom protoku kroz turbinski stupanj, pa s obzirom da se smanjenjem opterećenja smanjuje proizvodnja pare (slika 4.5), smanjuju se i tlakovi.

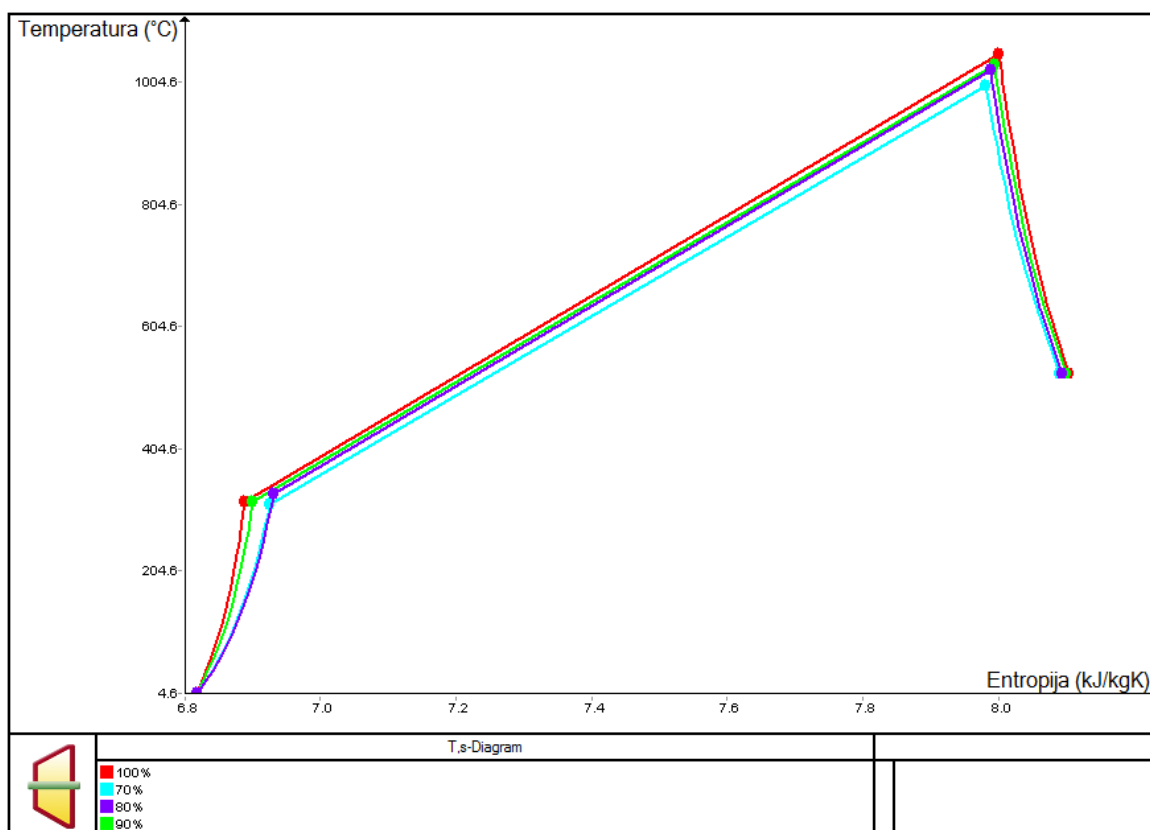


Slika 4.5: Ovisnost protoka VT pare o opterećenju



**Slika 4.6: Promjene tlakova u VT turbinskom stupnju promjenom opterećenja**

Utjecaj promjene opterećenja na plinsko-turbinski dio postrojenja prikazan je T,s dijagramom na slici 4.7. Može se uočiti da padom opterećenja pada temperatura dimnih plinova na ulazu u plinsku turbinu te tlak na izlazu iz kompresora odnosno na ulazu u plinsku turbinu, dok je temperatura na izlazu konstantna. Temperatura dimnih plinova na ulazu u plinsku turbinu kod 100% opterećenja (na slici označeno crvenom bojom) iznosi 1051,552 °C, a kod 70% opterećenja (na slici označeno svjetloplavom bojom) 1000,318°C. Pri punom opterećenju tlak na ulazu u plinsku turbinu je 11,55 bar, a pri 70% je smanjen na 9,949 bar.



**Slika 4.7: T,s dijagram plinsko-turbinskog dijela postrojenja za različita opterećenja**

### 4.3. Promjena stanja okolišnog zraka

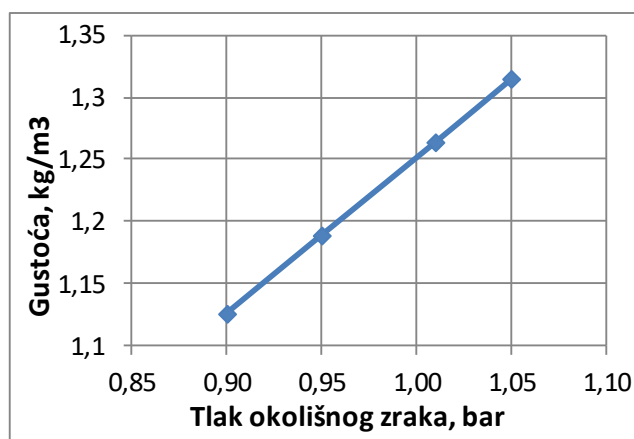
#### 4.3.1. Utjecaj promjene tlaka zraka

Prikazat će se utjecaj promjene tlaka okolišnog zraka, koji usisava kompresor. Simulacija će se provesti bez oduzimanja pare na parnoj turbini i uz konstantne parametre koji su dani u tablici 4.3. Simulacija je pokazala neznatnu promjenu temperature dimnih plinova na ulazu u plinsku turbinu promjenom tlaka zraka.

**Tablica 4.3: Konstantni parametri kod promjene tlaka okolišnog zraka**

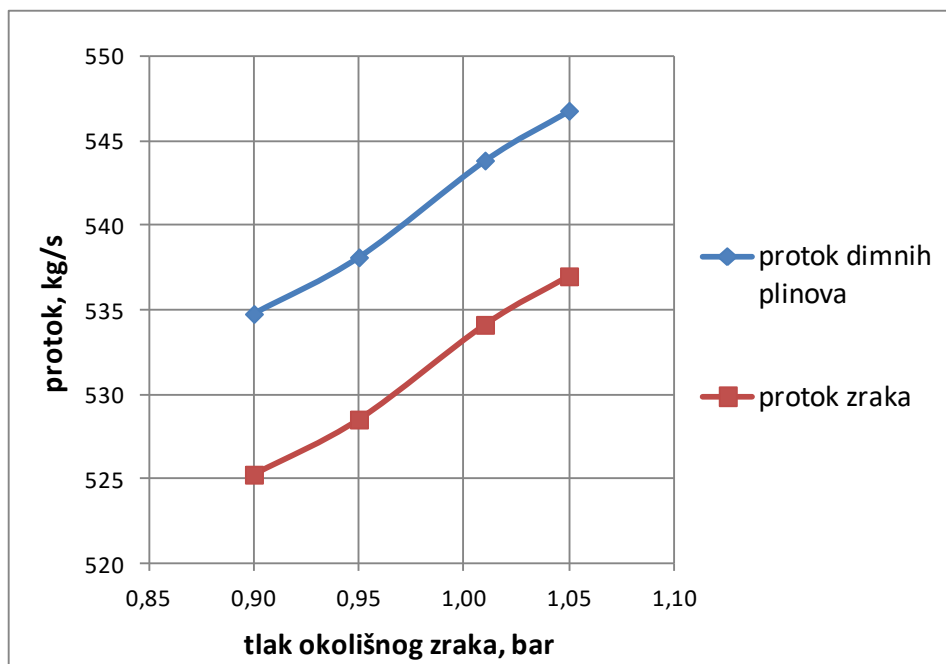
Temperatura okolišnog zraka [°C]	<b>4,6</b>
Opterećenje [%]	<b>100</b>
Relativna vlažnost zraka [%]	<b>60</b>
Temperatura dimnih plinova na ulazu u plinsku turbinu [°C]	<b>1051</b>
Tlak dimnih plinova na izlazu iz plinske turbine [bar]	<b>1,02</b>

Povećanjem okolišnog tlaka, povećava se gustoća zraka (slika 4.8), a posljedično i maseni protoka zraka za izgaranje, te ujedno i protok dimnih plinova kroz turbinu (slika 4.9). Zbog toga će doći i do porasta snage plinske turbine i ukupne električne snage kombiniranog postrojenja (slika 4.10). Snaga plinske turbine je pri tlaku od 1,05 bar veća za 23,572 MW, odnosno 16,54% u odnosu na snagu pri tlaku od 0,9 bar. Iz navedenog se zaključuje da utjecaj tlaka nije zanemariv, a posebno se to odnosi na postrojenja koja se nalaze na većim nadmorskim visinama gdje su tlakovi znatno niži.

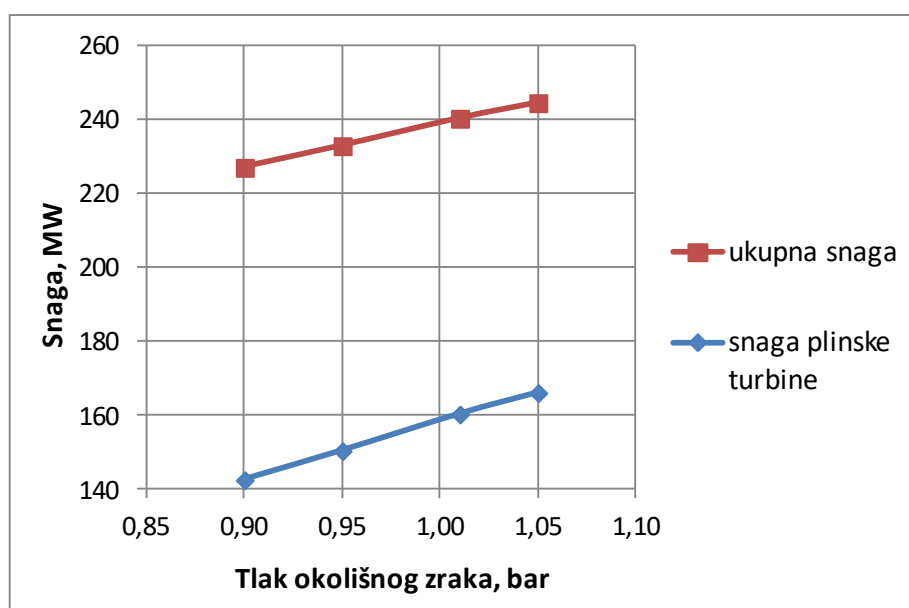


**Slika 4.8: Utjecaj tlaka okolišnog zraka na gustoću zraka**



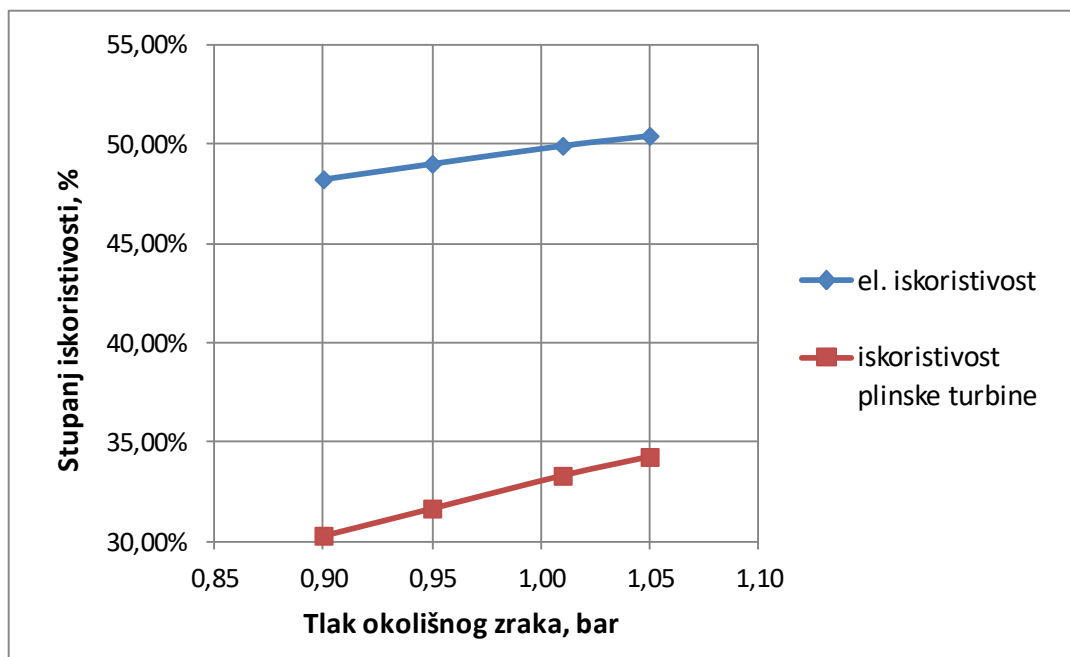


Slika 4.9: Utjecaj okolišnog tlaka na protok zraka i dimnih plinova



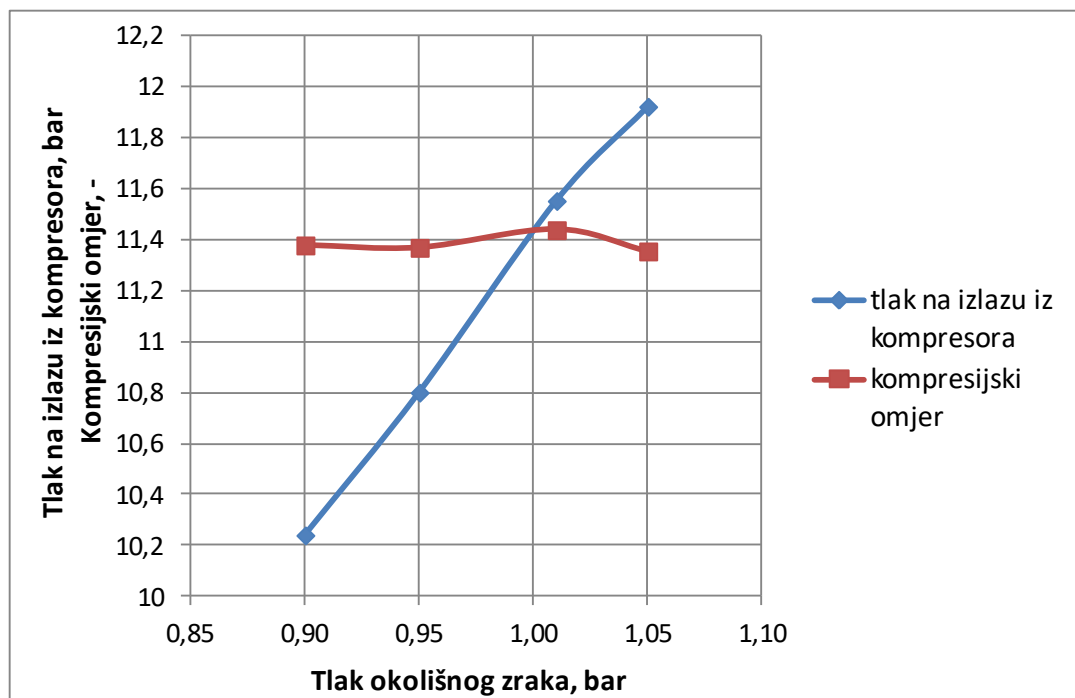
Slika 4.10: Utjecaj promjene okolišnog tlaka na snage

Kako je prikazano na slici 4.10 snage se povećavaju te će se povećanjem okolišnog tlaka povećavati i stupnjevi iskoristivosti što se vidi na slici 4.11. Iskoristivost proizvodnje električne energije, u ovom slučaju i ukupna iskoristivost, je kod tlaka okolišnog zraka od 1,05 bar veća za 2,19% u odnosu na onu kod tlaka od 0,9 bar, dok je iskoristivost plinsko-turbinskog dijela kod tlaka 1,05 bar veća za 3,97% u usporedbi s onom kod 0,9 bar.



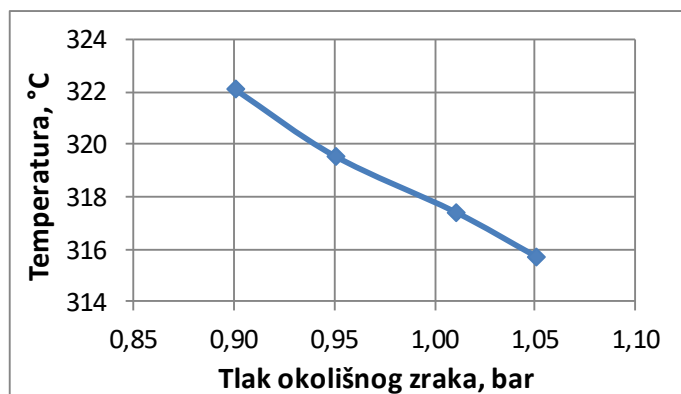
Slika 4.11: Utjecaj tlaka okolišnog zraka na stupnjeve iskoristivosti

Porastom tlaka okolišnog zraka dolazi do porasta tlaka na kraju kompresije što prikazuje slika 4.12. Na istoj slici prikazan je i kompresijski omjer, koji se, ovisno o usisnom tlaku kompresora tj. okolišnom tlaku, za navedeni slučaj neznatno mijenja te iznosi oko 11,4 bar.

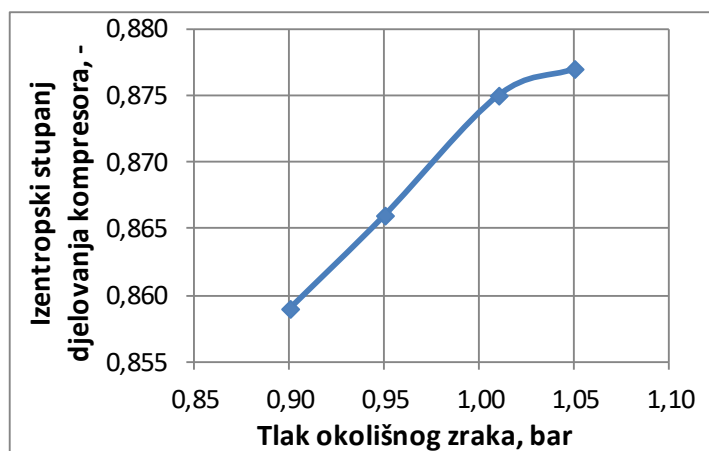


Slika 4.12: Ovisnost tlaka na izlazu iz kompresora i kompresijskog omjera o okolišnom tlaku

Temperatura zraka na kraju kompresije smanjuje se povećanjem tlaka okolišnog zraka (slika 4.13). Za promatrani slučaj temperatura na početku kompresije tj. temperatura zraka na ulazu u kompresor ista je za sve tlakove okolišnog zraka, a iz slike 4.12 vidi se da se i kompresijski omjer neznatno mijenja, pa se zaključuje da do smanjenja temperature zraka na izlazu iz kompresora dolazi zbog povećanja izentropskog stupnja djelovanja kompresora (slika 4.14), što se može provjeriti jednadžbom (3.3).

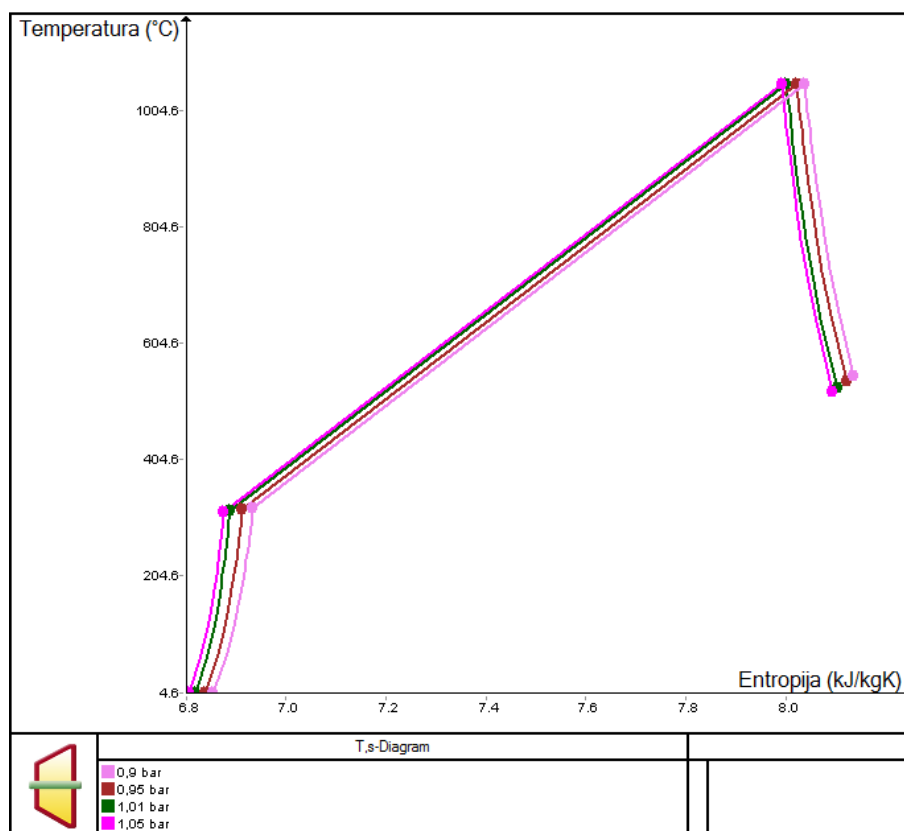


Slika 4.13: Ovisnost temperature zraka na izlazu iz kompresora o okolišnom tlaku



Slika 4.14: Ovisnost izentropskog stupnja djelovanja kompresora o okolišnom tlaku

Procesi u T,s dijagramu kod različitog tlaka okolišnog zraka prikazani su slikom 4.15. Na dijagramu se vidi kako je na ulazu u plinsku turbinu temperatura jednaka. Međutim kako je tlak na izlazu iz plinske turbine u svim procesima jednak, temperature na izlazu iz plinske turbine rastu smanjivanjem okolišnog tlaka, jer se ekspanzija u svim procesima odvija do tlaka od 1,02 bar. Na temelju ovog prikaza može se zaključiti da je najlošiji proces kod najmanjeg tlaka okolišnog zraka od 0,9 bar, što je i prikazano u prijašnjim rezultatima.



Slika 4.15: T,s dijagram plinsko-turbinskog dijela kod promjene okolišnog tlaka

#### 4.3.2. Utjecaj promjene temperature zraka

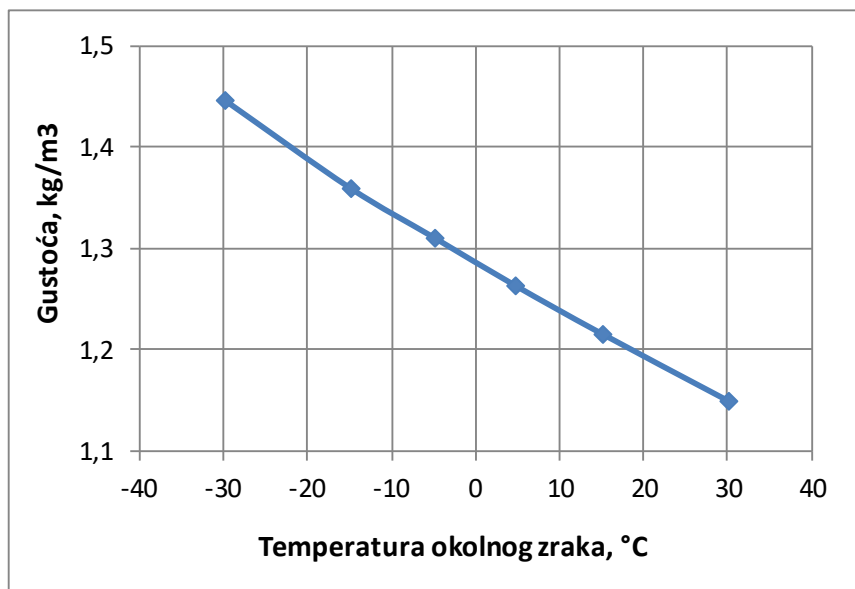
Kod analize utjecaja promjene temperature okolišnog zraka na rad postrojenja promatra se proces bez oduzimanja pare na parnoj turbini uz pretpostavku određenih konstantnih parametara (tablica 4.4). U stvarnosti se tlak i relativna vlažnost zraka mijenjaju, no radi odvojenog prikaza utjecaja promjene temperature, pretpostavljeno je da su konstantni. Simulacijom je utvrđeno da promjena temperature nema značajan utjecaj na temperaturu dimnih plinova na ulazu u plinsku turbinu.

Tablica 4.4: Konstantni parametri kod promjene temperature okolišnog zraka

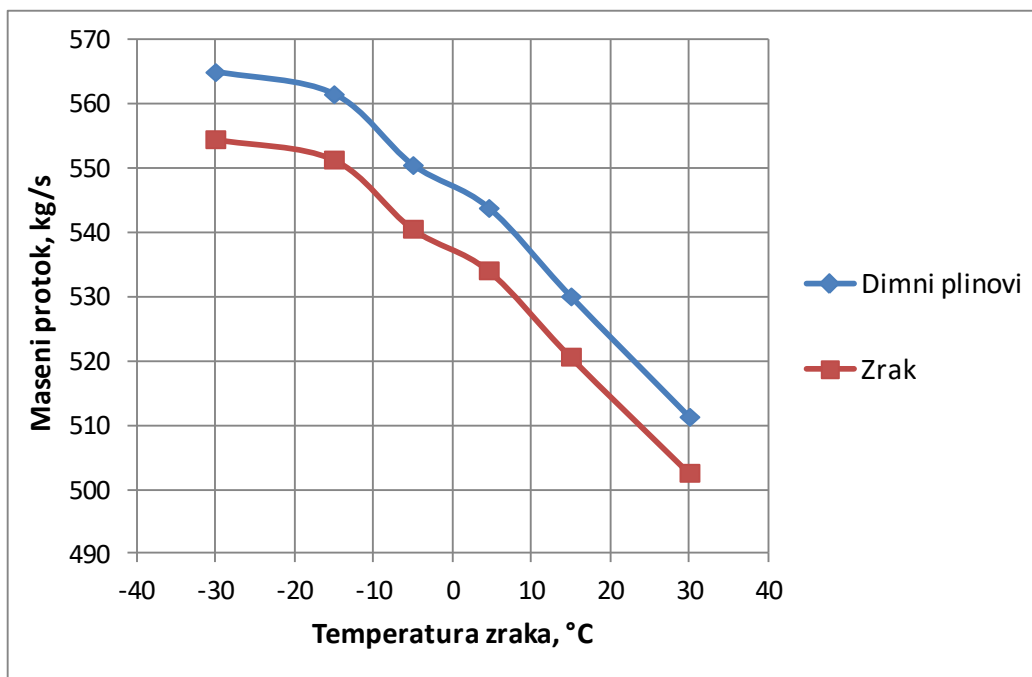
Tlak okolišnog zraka [bar]	<b>1,01</b>
Relativna vlažnost zraka [%]	<b>60</b>
Opterećenje [%]	<b>100</b>
Temperatura dimnih plinova na ulazu u plinsku turbinu [°C]	<b>1051</b>
Tlak dimnih plinova na izlazu iz plinske turbine [bar]	<b>1,02</b>

Porastom temperature zraka smanjuje se gustoća zraka što je prikazano slikom 4.16. Zbog manje gustoće manji je i maseni protok zraka, a smanjuje se i maseni protok goriva te ujedno i dimnih plinova (slika 4.17), pa se posljedično smanjuje i snaga plinske turbine te ukupna električna snaga postrojenja (slika 4.18). Ukupna snaga kod temperature okolnog zraka od  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  veća je za 32,312 MW odnosno 14,5% u odnosu na ukupnu snagu kod  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$  te je utjecaj promjene temperature značajan. Taj je utjecaj još izraženiji kod plinske turbine gdje je snaga kod  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  veća za 26%. Na ukupnu snagu utječe i snaga parne turbine te se zato postotak razlikuje.

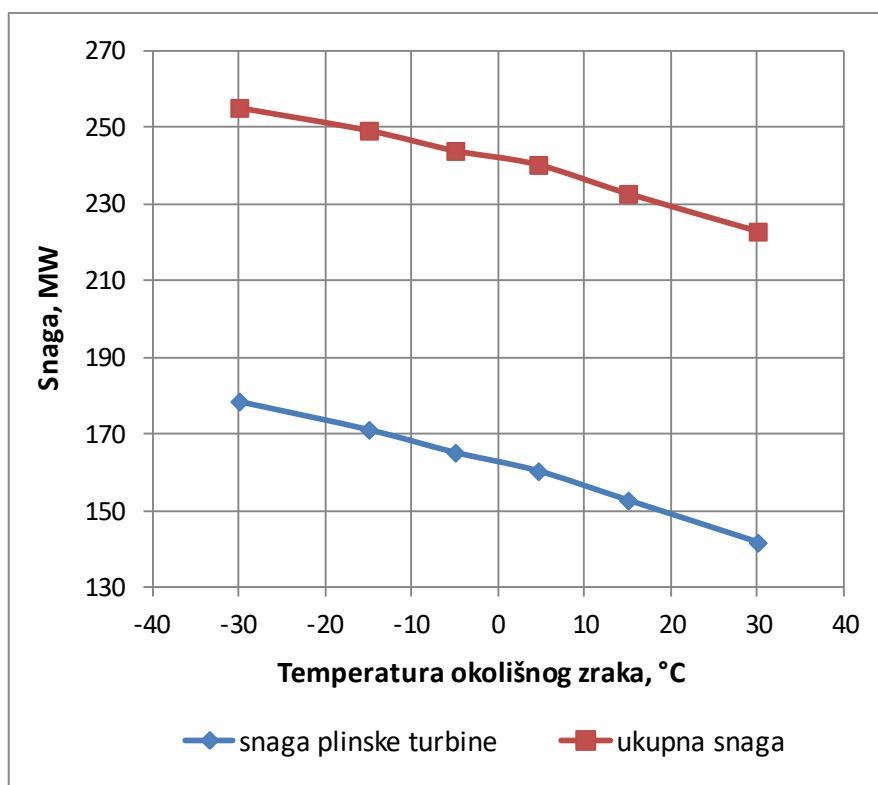
Kod temperature od  $15\text{ }^{\circ}\text{C}$  ukupna snaga iznosi 232,762 MW, te je 1,2% veća od ukupne nazivne električne snage od 230 MW. Međutim razlika nije velika, a posljedica je određenih pretpostavljenih vrijednosti, pa se zaključuje da model daje zadovoljavajuće rezultate kod promjene okolišne temperature.



Slika 4.16: Promjena gustoće zraka promjenom temperature



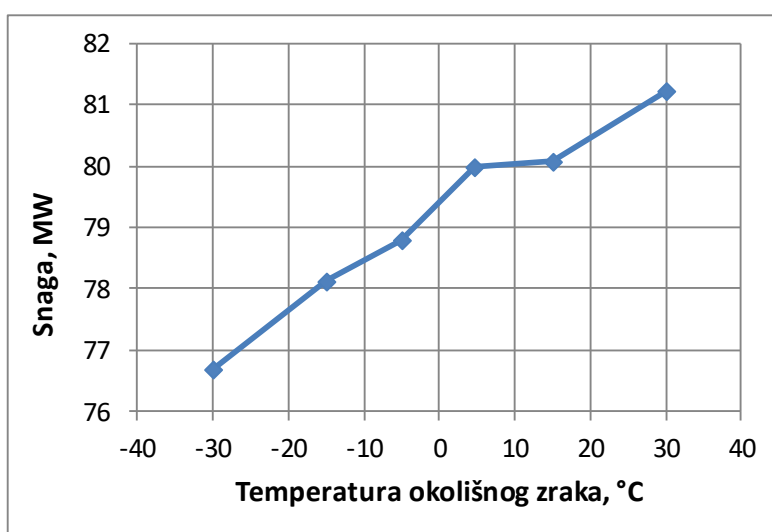
Slika 4.17: Utjecaj temperature zraka na protok zraka i protok dimnih plinova



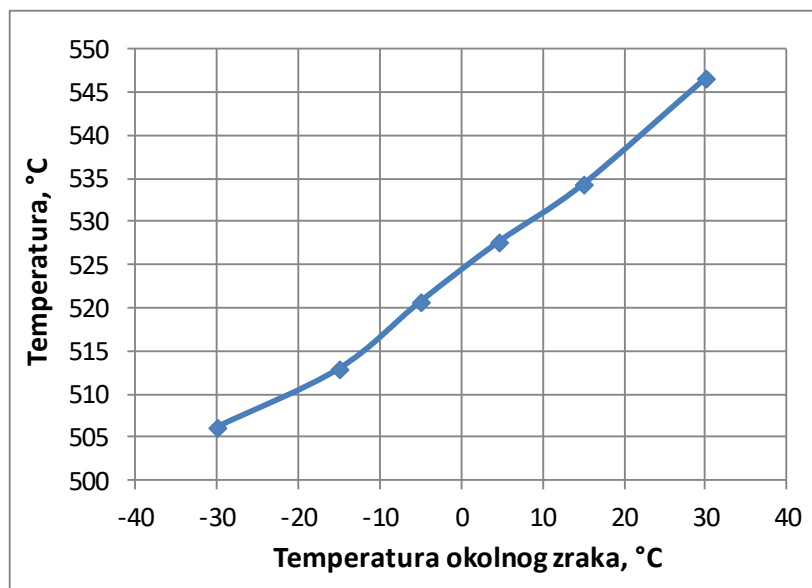
Slika 4.18: Utjecaj temperature okolnog zraka na snagu plinske turbine i ukupnu snagu

Na slici 4.19 prikazana je ovisnost snage parne turbine o temperaturi okolnog zraka. Porastom temperature okolnog zraka, snaga parne turbine raste. Do povećanja dolazi jer porastom

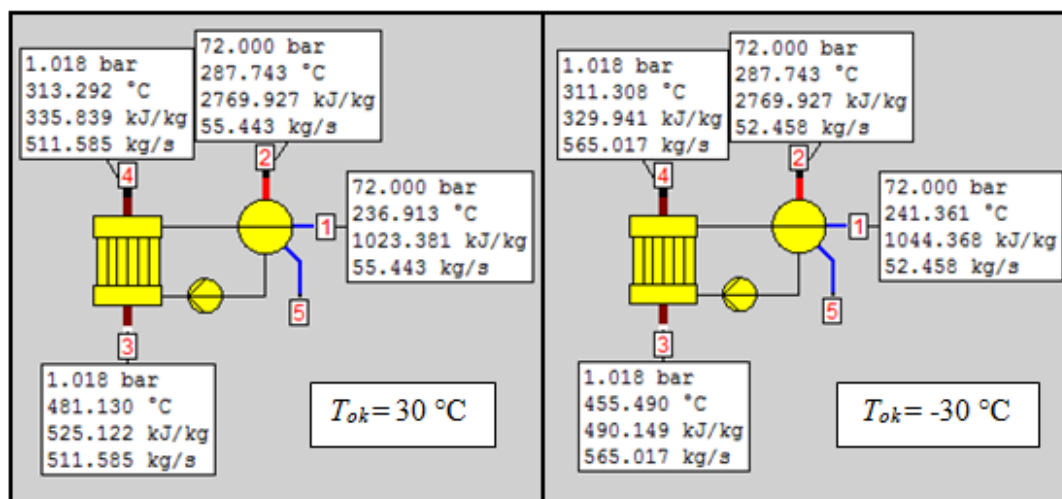
temperature okolnog zraka raste temperatura dimnih plinova na izlazu iz plinske turbine (slika 4.20) te ujedno i njihova specifična entalpija. Na slici 4.21 prikazana su svojstva komponente VT isparivača pri temperaturi okolnog zraka od  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ , odnosno  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ , gdje je brojem 3 označeno ulazno stanje dimnih plinova, brojem 4 njihovo izlazno stanje, stanje vode na ulazu označeno je brojem 1, dok broj 2 predstavlja stanje pare na izlazu. Vidi se da se stanje pare na izlazu isparivača ne mijenja, dok je promjena stanja vode na ulazu neznatna. Izračunom razlika entalpija dimnih plinova na ulazu i izlazu iz VT isparivača određuje se da je ta razlika kod  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$  18,15% veća u odnosu na onu kod  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ , a maseni protok dimnih plinova manji je za 9,5% kod  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$  u odnosu na  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Može se zaključiti da se razlika specifičnih entalpija dimnih plinova na ulazu i izlazu VT isparivača povećava više, nego se maseni protok dimnih plinova smanjuje te zbog navedenog, prema jednadžbi (3.34) za izmjenjeni toplinski tok na VT isparivaču, slijedi da će se taj toplinski tok povećavati (slika 4.22). Kod okolišne temperature od  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$  izmjenjeni toplinski tok iznosi 96834,425 kW, a kod  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  je 90520,024 kW te je manji za 6,52%. Na slici 4.25 može se vidjeti i da je temperatura dimnih plinova na ulazu u isparivač (desna strana dijagrama) viša, kod više temperature okolnog zraka, isto tako vidi se da je temperatura isparavanja jednaka za oba slučaja te iznosi  $287,743\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Što je veći toplinski tok, veća je i količina proizvedene VT pare, jer je razlika specifičnih entalpija pare i vode praktički jednaka za obje temperature (jednadžba (3.34)). Maseni protok pare povećava se slično kao i snaga parne turbine (slika 4.23), te zbog povećanja masenog protoka pare dolazi do povećanja snage parna turbine. Snaga je kod  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$  veća za 5,93% od one kod  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ .



Slika 4.19: Utjecaj temperature okolnog zraka na snagu parne turbine

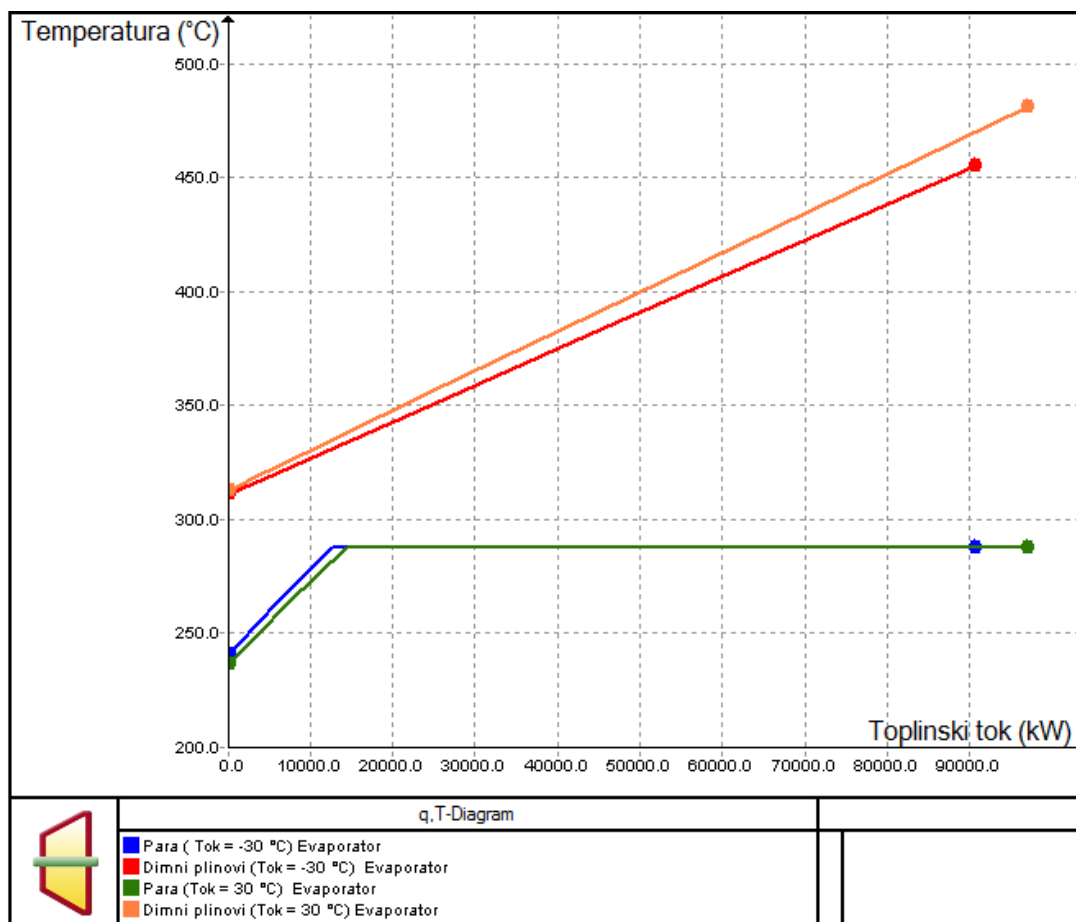


Slika 4.20: Utjecaj temperature okolnog zraka na temperaturu na izlazu iz plinske turbine

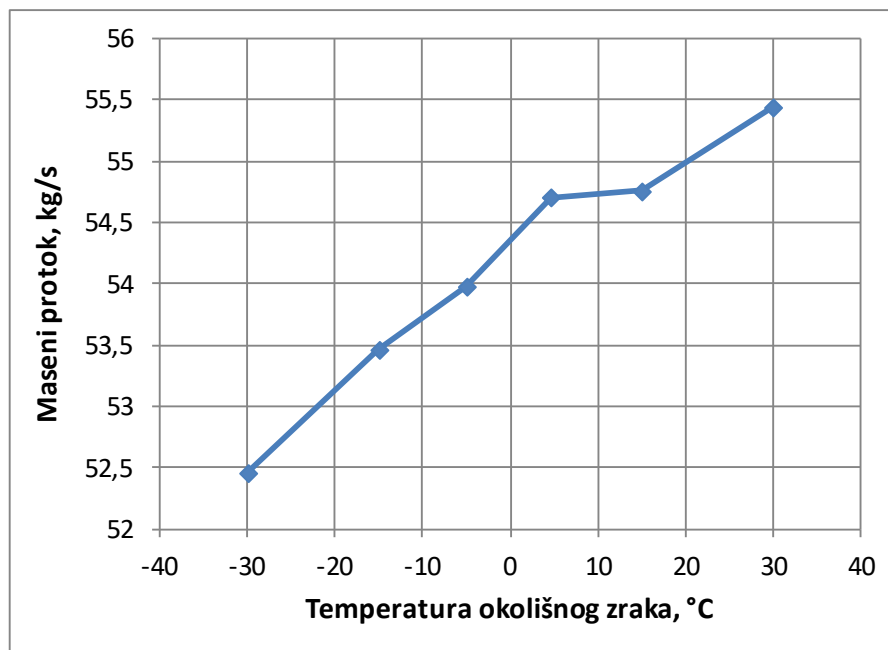


Slika 4.21: Svojstva dimnih plinova i pare (vode) na VT isparivaču kod različite temperature okolnog zraka



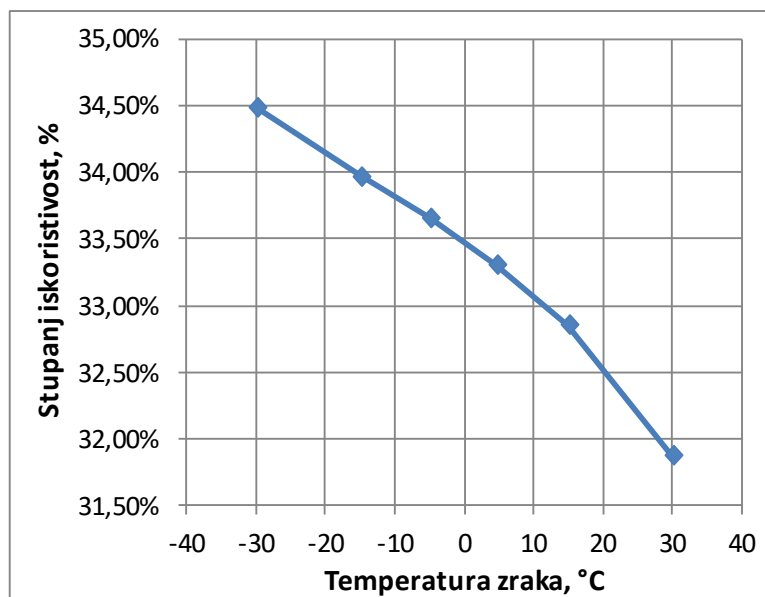


Slika 4.22: q,T dijagram VT isparivača za različite temperature okolišnog zraka



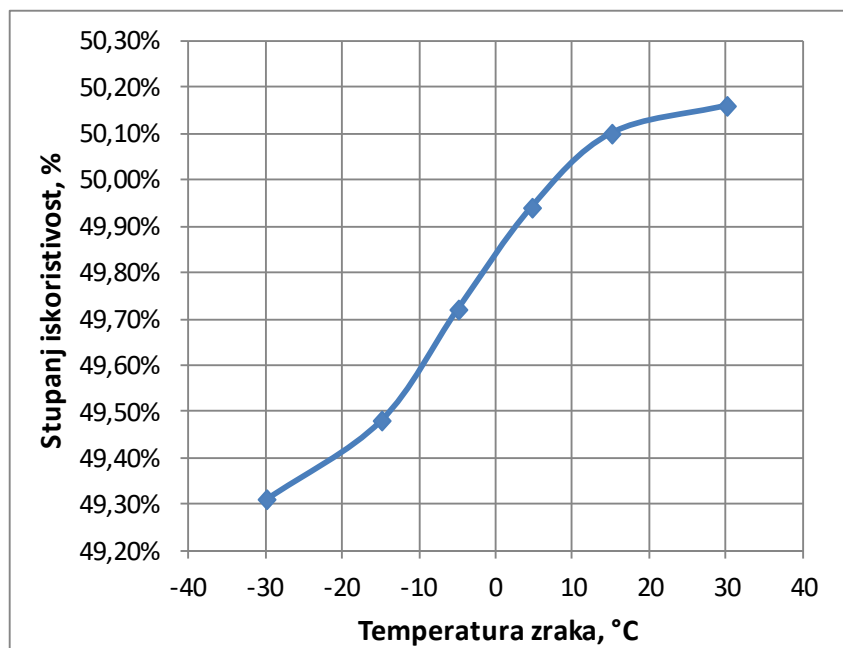
Slika 4.23: Utjecaj temperature okolnog zraka na maseni protok VT pare

Utjecaj promjene temperature vanjskog zraka na stupanj iskoristivosti plinske turbine prikazan je slikom 4.24, te sa porastom temperature iskoristivost pada. Iskoristivost plinske turbine smanjuje se jer se snaga plinske turbine, koja je 20,65% manja kod 30 °C u odnosu na -30 °C, smanjuje više od uložene toplinske snage gorivom čije smanjenje iznosi 14,15%. S obzirom da je stupanj iskoristivosti plinske turbine jednak omjeru snage plinske turbine i uložene toplinske snage (jednadžba (3.32)), jasno je da se mora smanjivati.

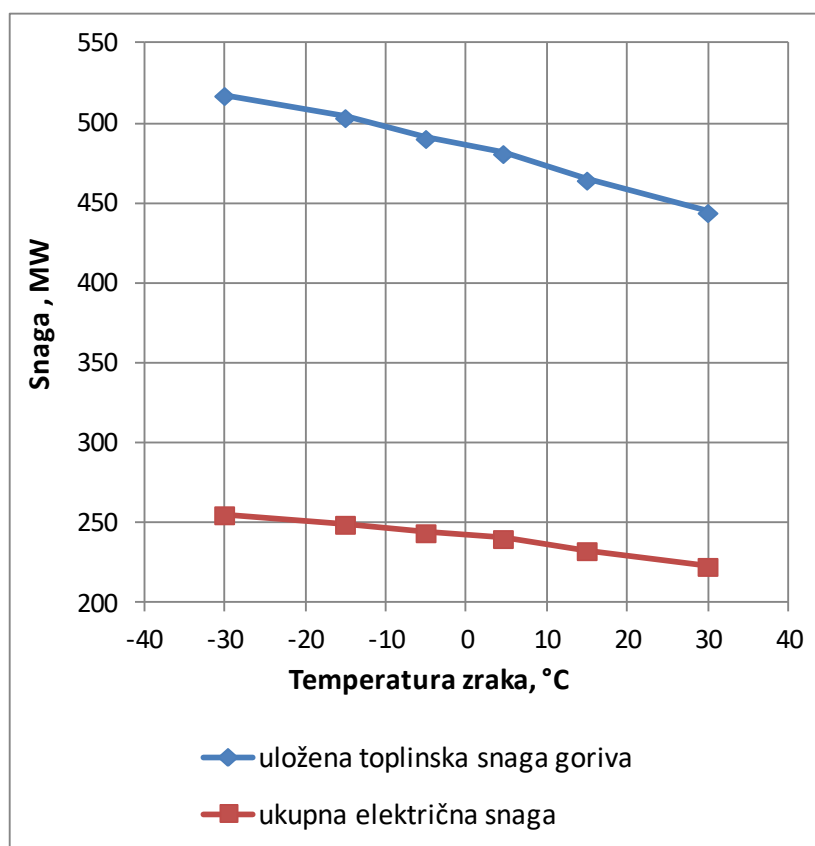


**Slika 4.24: Utjecaj temperature okolnog zraka na iskoristivost plinske turbine**

Slikom 4.25 prikazan je utjecaj temperature okolišnog zraka na električni, u ovom slučaju ukupni stupanj iskoristivosti jer je u analizi pretpostavljeno da nema oduzimanja pare na parnoj turbini. Ukupni (električni) stupanj iskoristivosti raste porastom temperature zraka, iako se ukupna snaga smanjuje, međutim to povećanje iznosi samo 0,85% u rasponu temperatura okolnog zraka od -30 °C do 30 °C. Razlog povećanja je smanjenje potrošnje goriva, pa je i uložena toplinska snaga gorivom manja. Navedeno ima veći utjecaj na ukupni stupanj iskoristivosti od smanjenja ukupne snage, tj. smanjenje toplinske snage goriva veće je od smanjenja ukupne snage, a ukupna iskoristivost jednaka je omjeru ukupne snage i uložene toplinske snage goriva pa zato ukupna iskoristivost raste (prema jednadžbi (3.49)). Utjecaj temperature zraka na uloženu toplinsku snagu goriva i ukupnu snagu postrojenja prikazuje slika 4.26 te se može vidjeti kako je krivulja toplinske snage goriva strmija od one ukupne snage. Toplinska snaga goriva je kod temperature okolnog zraka od 30 °C manja za 73,253 MW ili 14,15% u odnosu na onu kod temperature od -30 °C, a ukupna snaga manja je za 12,66%.

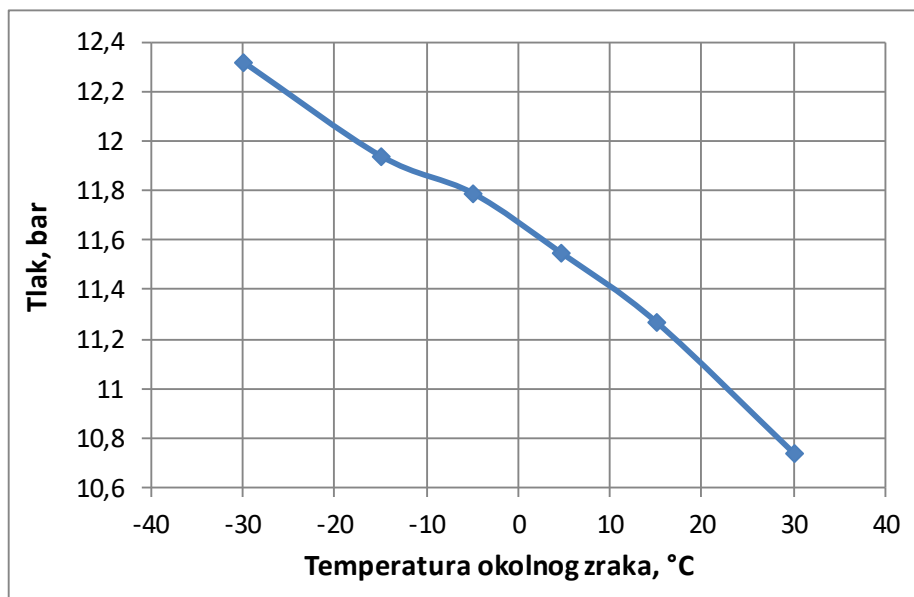


Slika 4.25: Utjecaj temperature okolnog zraka na električni (ukupni) stupanj iskoristivosti postrojenja

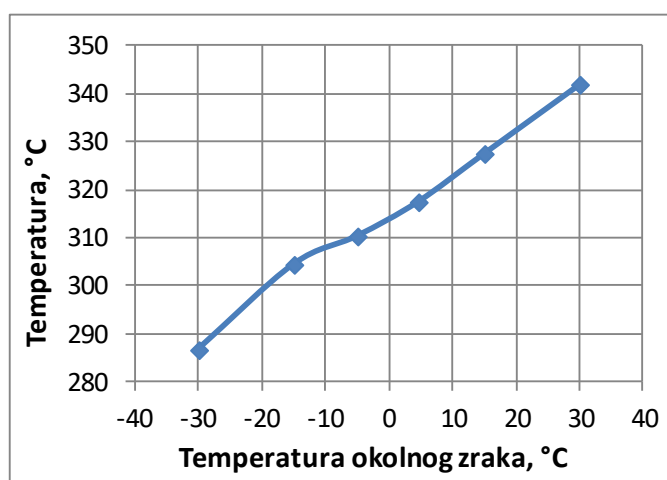


Slika 4.26: Utjecaj temperature okolnog zraka na uloženu toplinsku snagu goriva i ukupnu snagu

Promjena tlaka i temperature na izlazu iz kompresora prikazane su na slikama 4.27 i 4.28. Povećanjem temperature okolnog zraka smanjuje se tlak na izlazu iz kompresora, dok temperatura na izlazu iz kompresora raste (prema jednadžbi (3.1) i (3.3)).

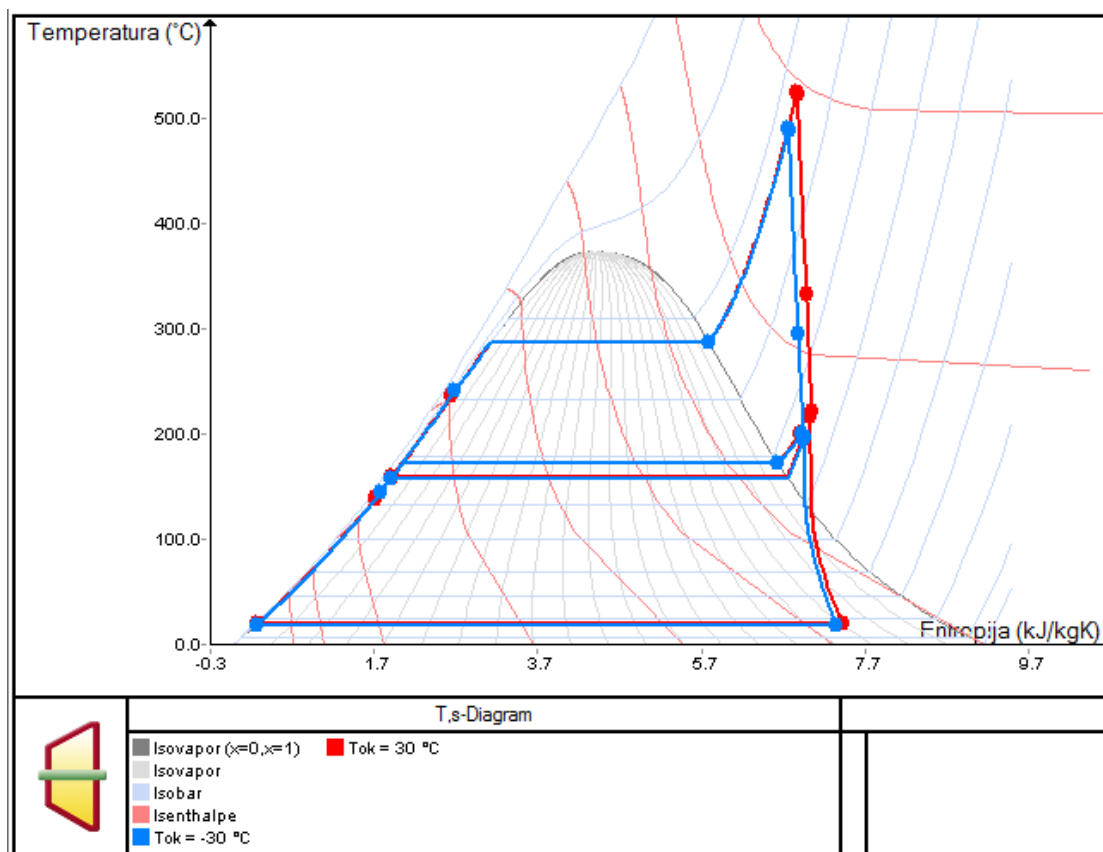


Slika 4.27: Utjecaj temperature okolnog zraka na tlak zraka na izlazu iz kompresora



Slika 4.28: Utjecaj temperature okolnog zraka na temperaturu zraka na izlazu iz kompresora

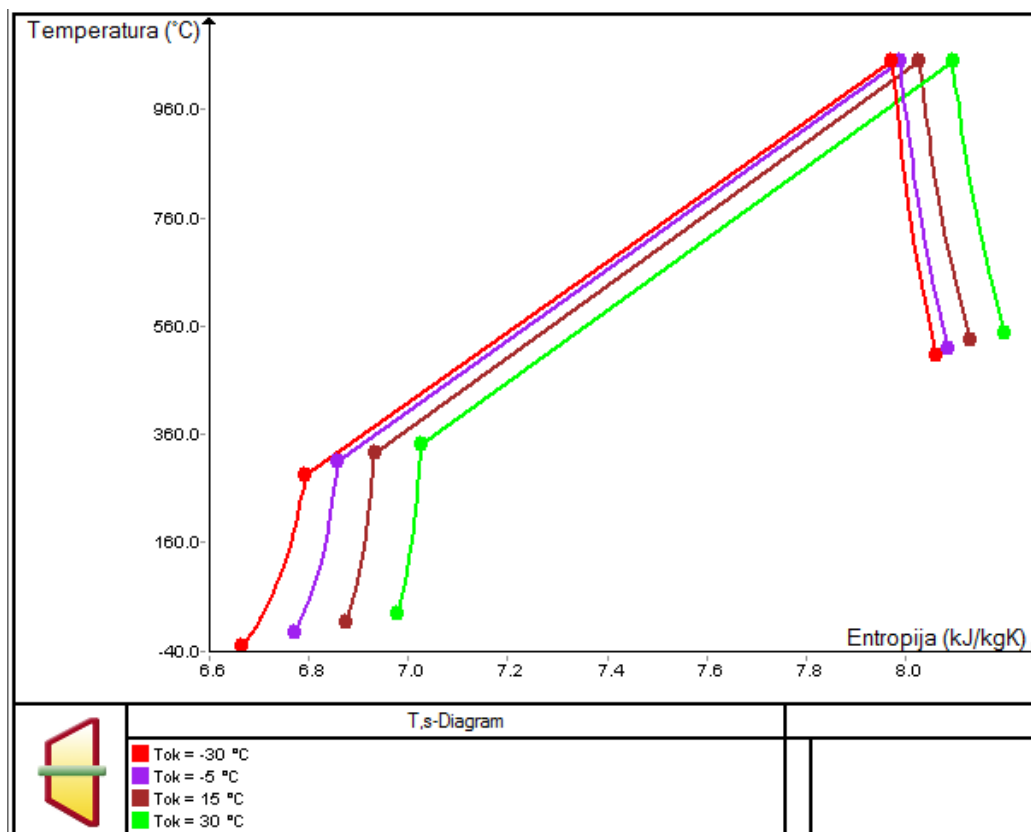
Slika 4.29 prikazuje T,s dijagram Rankine-ovog procesa za različite temperature okolnog zraka. Može se uočiti da su dijagrami slični te se ne mijenjaju tlakovi u isparivačima, otplinjaču i u kondenzatoru. Međutim kao što je prije naglašeno porastom temperature okolnog zraka povećava se izmjenjeni toplinski tok na VT isparivaču, ali i na VT pregrijaču pa je zbog toga temperatura pare na izlazu iz VT pregrijača veća kod temperature okolnog zraka od 30 °C.



Slika 4.29: T,s dijagram Rankine-ovog procesa za različite temperature okolnog zraka

Utjecaj promjene temperature okolnog zraka na T,s dijagram plinsko-turbinskog dijela prikazan je slikom 4.30. Kao što je prije prikazano i ovdje se vidi da porastom temperature okolnog zraka, raste temperatura zraka na izlazu iz kompresora i temperatura dimnih plinova na izlazu iz plinske turbine, dok se tlak na izlazu iz kompresor smanjuje.

Usporedbom slika 4.29 i 4.30, može se zaključiti da utjecaj promjene okolne temperature ima puno veći utjecaj na plinsko-turbinski dio.

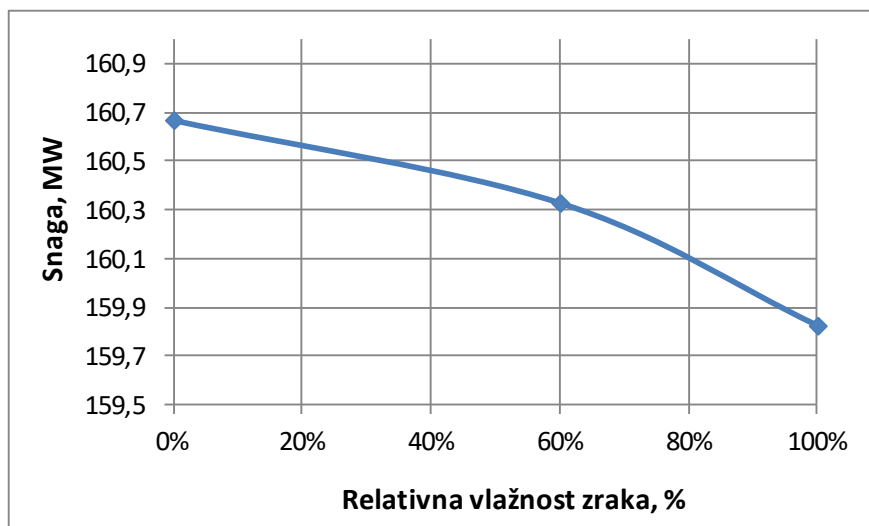


Slika 4.30: T,s dijagram plinsko-turbinskog dijela za različite temperature okolnog zraka

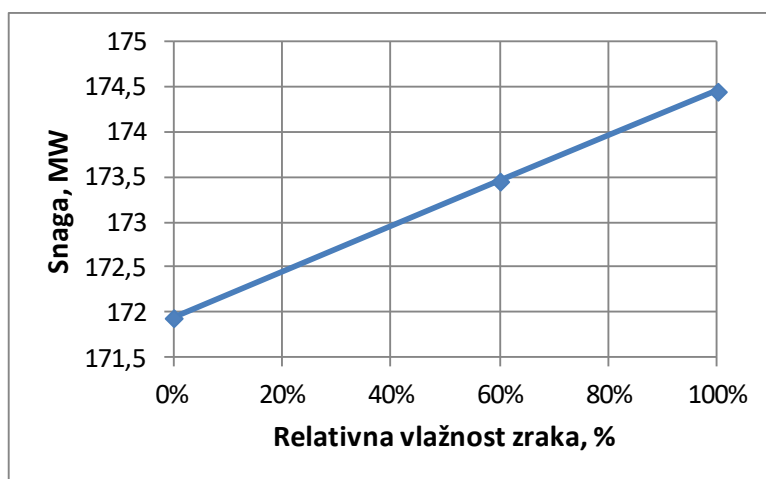
#### 4.3.3. Utjecaj promjene relativne vlažnosti zraka

Isto kao i u prethodnim slučajevima promatra se proces bez oduzimanje pare. Radi odvojenog prikaza utjecaja promjene relativne vlažnosti zraka, temperatura i tlak okolnog zraka neće se mijenjati, a relativna vlažnost mijenja se od 0% (suhi zrak) do 100% (zrak potpuno zasićen vodenom parom). Analizom je utvrđeno da promjena relativne vlažnosti zraka ima zanemariv utjecaj na rad postrojenja. Na slici 4.31 prikazana je promjena snage na generatoru plinske turbine te se vidi da povećanjem relativne vlažnosti snaga pada. Kod relativne vlažnosti od 0% snaga plinske turbine veća je za 0,53% ili 0,844 MW u odnosu na snagu kod 100% relativne vlažnosti. Električna snaga plinske turbine pada jer je zbog više vlage u zraku potrebna veća snaga za pogon kompresora (slika 4.32).

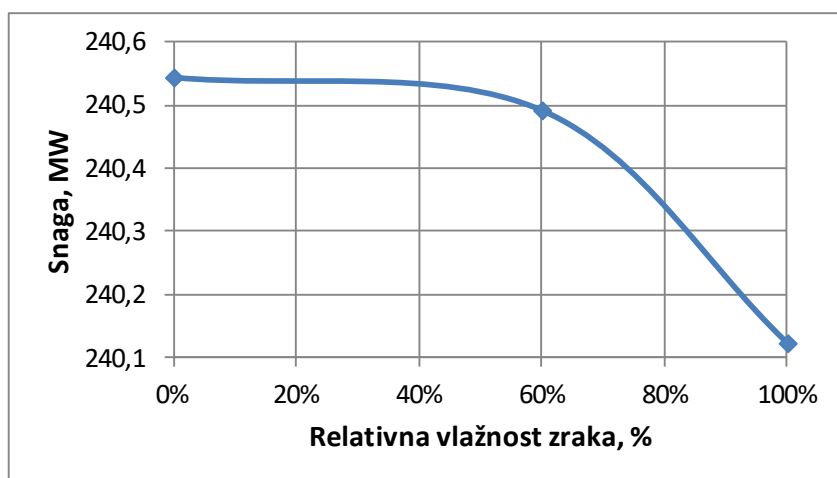
Kod ukupne električne snage (slika 4.33) je ta promjena još manje izražena, jer porastom relativne vlažnosti, snaga parne turbine neznatno raste zbog povećanja masenog protoka dimnih plinova (raste zbog više vlage u zraku), pa je i proizvodnja pare nešto veća. Ukupna snaga smanjuje se za 0,421 MW tj. 0,18%. Iz navedenog se zaključuje da promjena relativne vlažnosti nema značajan utjecaj na rad postrojenja.



Slika 4.31: Utjecaj promjene relativne vlažnosti zraka na snagu plinske turbine

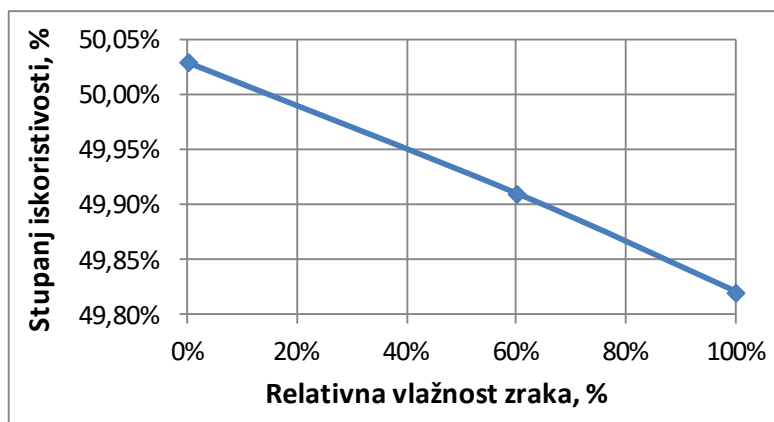


Slika 4.32: Utjecaj promjene relativne vlažnosti zraka na snagu kompresora



Slika 4.33: Utjecaj promjene relativne vlažnosti zraka na ukupnu snagu

Na slici 4.34 prikazana je ovisnost električne iskoristivosti o relativnoj vlažnosti te se povećanjem relativne vlažnosti iskoristivost smanjuje, ali to smanjenje iznosi samo 0,21%.



Slika 4.34: Utjecaj relativne vlažnosti na električnu iskoristivost postrojenja

#### 4.4. Rad postrojenja u ovisnosti o toplinskoj snazi procesne pare

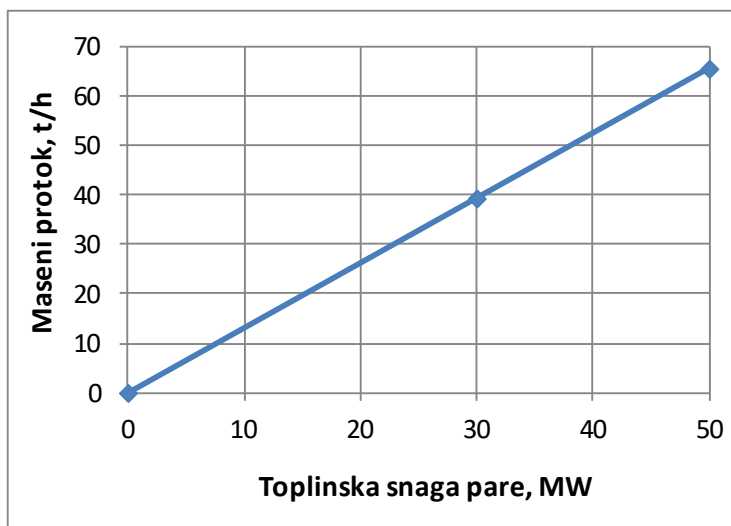
Utjecaj toplinske snage procesne pare analiziran je kod konstantnih parametara prikazanih u tablici 4.5, a toplinska snaga pare se mijenja od 0 do 50 MW<sub>t</sub>. Snaga plinske turbine se ne mijenja jer promjena toplinske snage pare nema utjecaja na plinsko-turbinski dio. Dodatno je prikazan utjecaj kod promjene opterećenja i temperature okolnog zraka.

Tablica 4.5: Konstantni parametri kod promjene toplinske snage

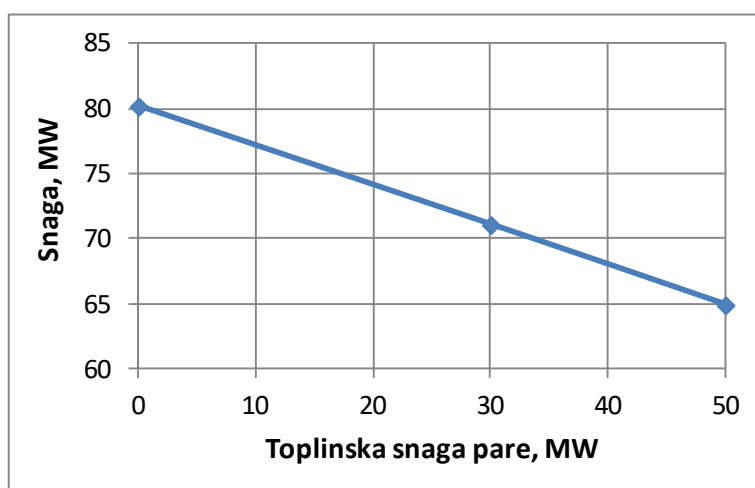
temperatura okolnog zraka [°C]	4,6
Tlak okolnog zraka [bar]	1,01
Relativna vlažnost zraka [%]	60
Snaga plinske turbine [MW]	160,33

Povećanjem toplinske snage procesne pare povećava se maseni protok pare koja se oduzima na parnoj turbini (slika 4.35) pa se snaga turbine smanjuje (slika 4.36), jer je maseni protok pare kroz turbinu manji. Snaga na generatoru parne turbine je kod toplinske snage od 50 MW<sub>t</sub> manja za 15 MW<sub>e</sub> u odnosu na proces bez oduzimanje pare.





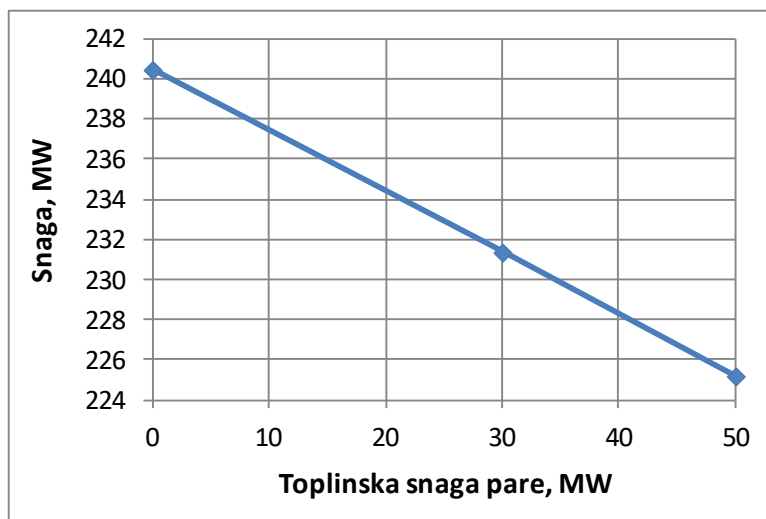
Slika 4.35: Utjecaj toplinske snage na maseni protok oduzimanja pare



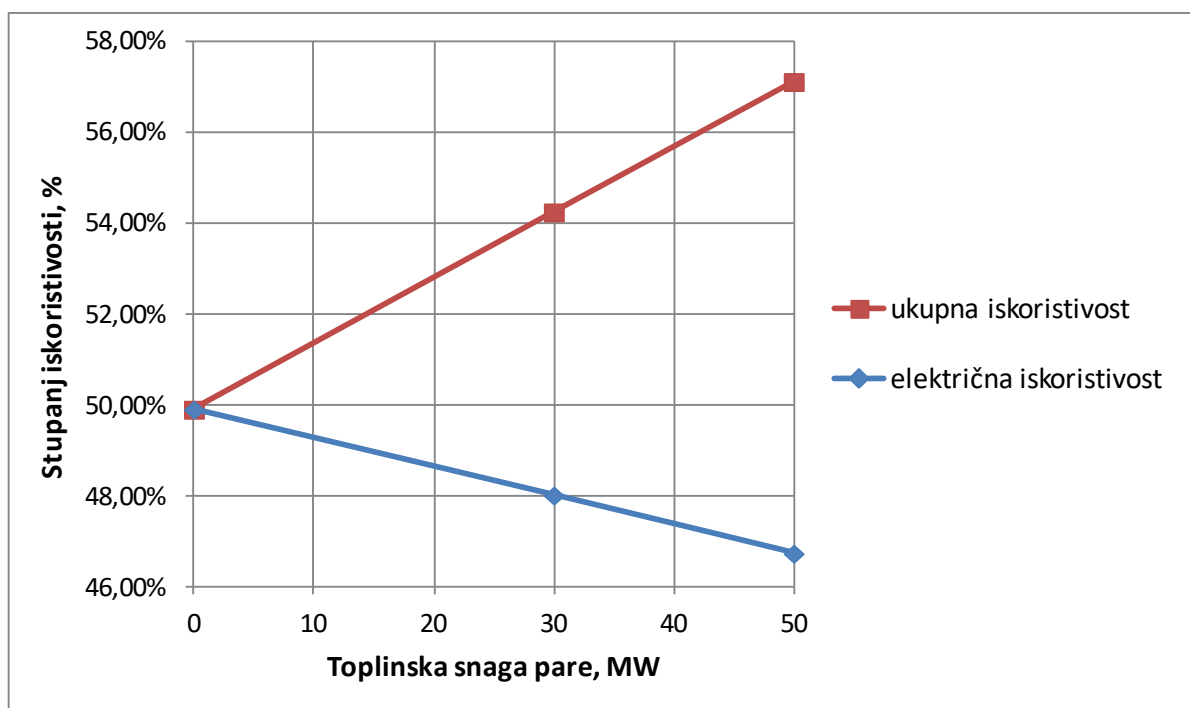
Slika 4.36: Ovisnost snage parne turbine o toplinskoj snazi

Uzimajući u obzir konstantnu snagu plinske turbine, jasno je da se ukupna električna snaga postrojenja mijenja samo zbog promjene snage parne turbine, tj. smanjuje se povećanjem toplinske snage pare te je krivulja ukupne snage slična krivulji snage parne turbine (slika 4.37).

Smanjenjem ukupne snage postrojenja smanjuje se i električni stupanj iskoristivosti kombiniranog postrojenja, ali ukupna iskoristivost postrojenja raste (slika 4.38), jer je smanjenje ukupne električne snage manje od povećanja toplinske snage (prema jednadžbi (3.50) za ukupni stupanj iskoristivosti). Ukupna iskoristivost kod toplinske snage od  $50 \text{ MW}_t$  iznosi 57,12% te je 7,21% veća u odnosu na onu kod  $0 \text{ MW}_t$ .

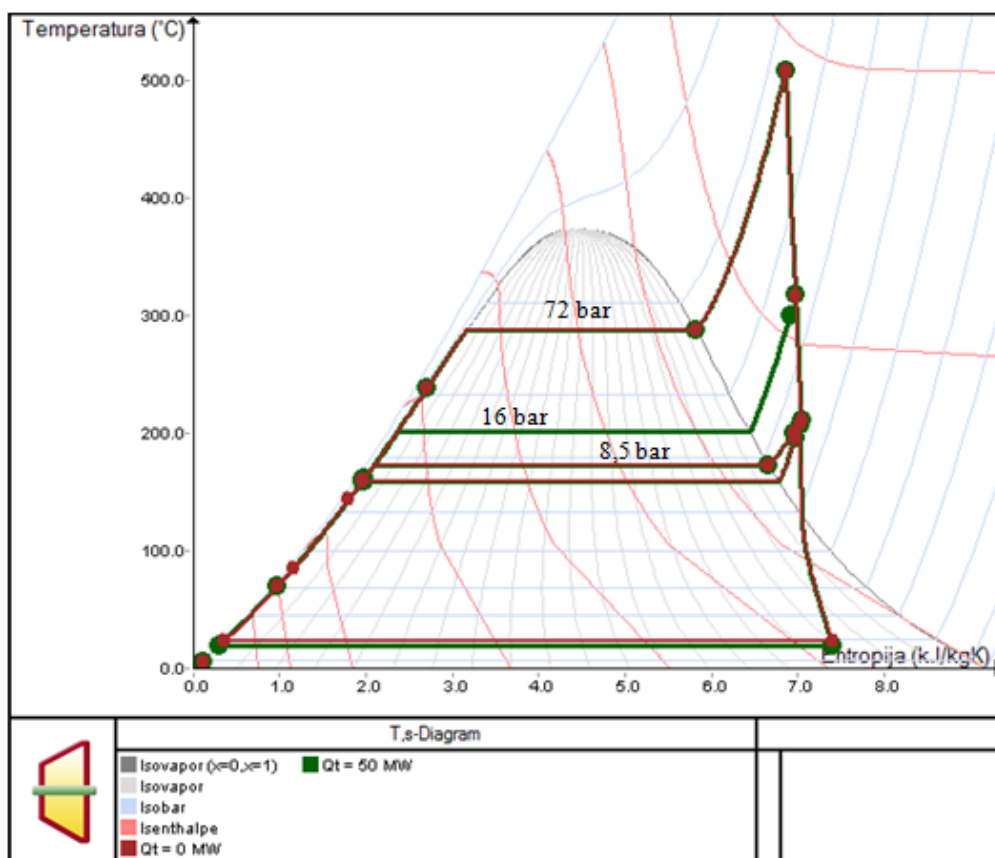


Slika 4.37: Utjecaj promjene toplinske snage na ukupnu snagu postrojenja



Slika 4.38: Utjecaj promjene toplinske snage na stupnjeve iskoristivosti

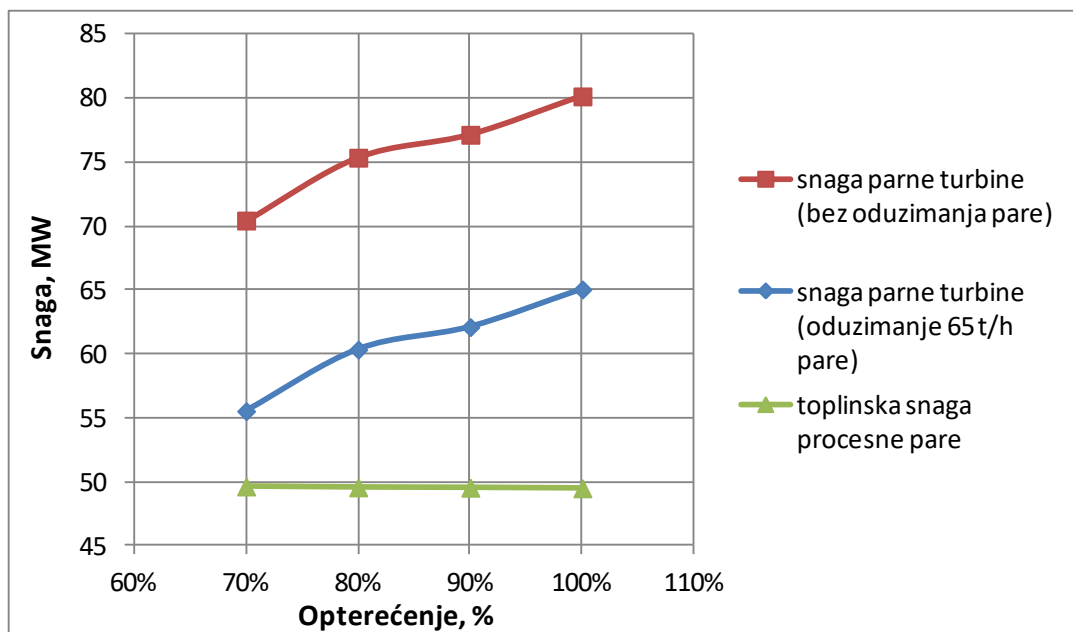
Proces s oduzimanjem i bez oduzimanja pare u T,s dijagramu prikazuje slika 4.39. Može se vidjeti da oduzimanje pare tj. povećanje toplinske snage pare nema nikakav utjecaj na svojstva pare. Tlakovi i temperature isparavanja su isti, nisu se promijenile ni temperature pregrijanja pare kao niti specifične entalpije, što znači da na snagu parne turbine jedino utječe maseni protok oduzimanja pare. Na slici su označeni tlakovi u VT isparivaču (72 bar) i NT isparivaču (8,5 bar) te tlak oduzimanja pare od 16 bar pri toplinskoj snazi od 50 MW<sub>t</sub>.



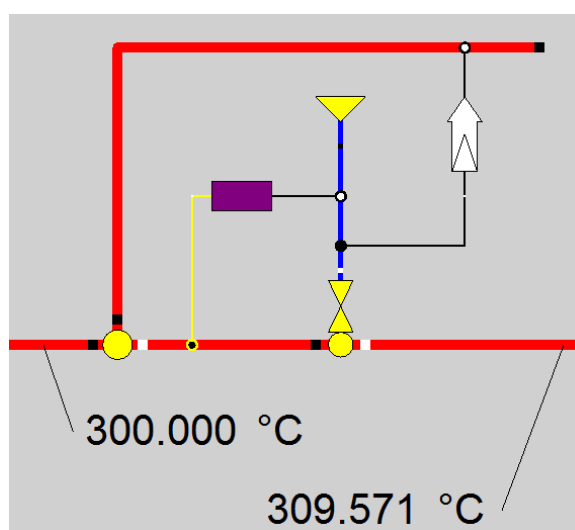
Slika 4.39: T,s dijagram s i bez oduzimanja pare

Usporedbu procesa bez oduzimanja pare i s oduzimanjem 65 t/h pare (50 MW<sub>t</sub>) na parnoj turbini pri različitim električnim opterećenjima prikazuje slika 4.40. Na istoj slici prikazana je i toplinska snaga pare oduzimanja koja se blago smanjuje porastom opterećenja zbog povećanja temperature pare oduzimanja pa je potrebna veća količina svježje vode koja se ubrizgava u paru oduzimanja kako bi joj se temperatura smanjila na podešenu vrijednost od 300 °C. Kod 100% opterećenja je temperatura pare oduzimanja 318,245 °C te se ubrizgava 0,247 kg/s vode temperature 15 °C, a kod 70% opterećenja temperatura pare oduzimanja iznosi 309,571 °C te je potrebno ubrizgati 0,127 kg/s vode.

Regulacija temperature pare oduzimanja prikazana je na slici 4.41 te se vrši mijenjanjem masenog protoka ubrizgavane vode. Bijela strelica na slici označava prenošenje vrijednosti te se koristi kako bi se očuvala masena bilanca tj. odvodi se para čiji je maseni protok jednak onom ubrizgavane vode.

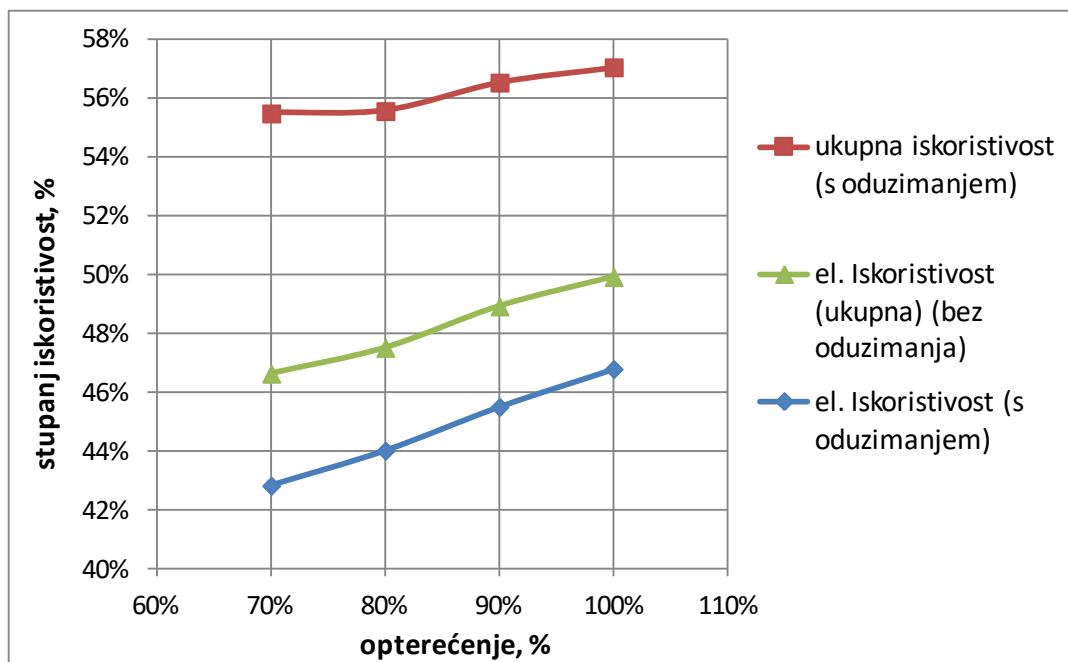


**Slika 4.40: Snaga parne turbine s i bez oduzimanja pare i toplinska snaga procesne pare pri različitim opterećenjima**



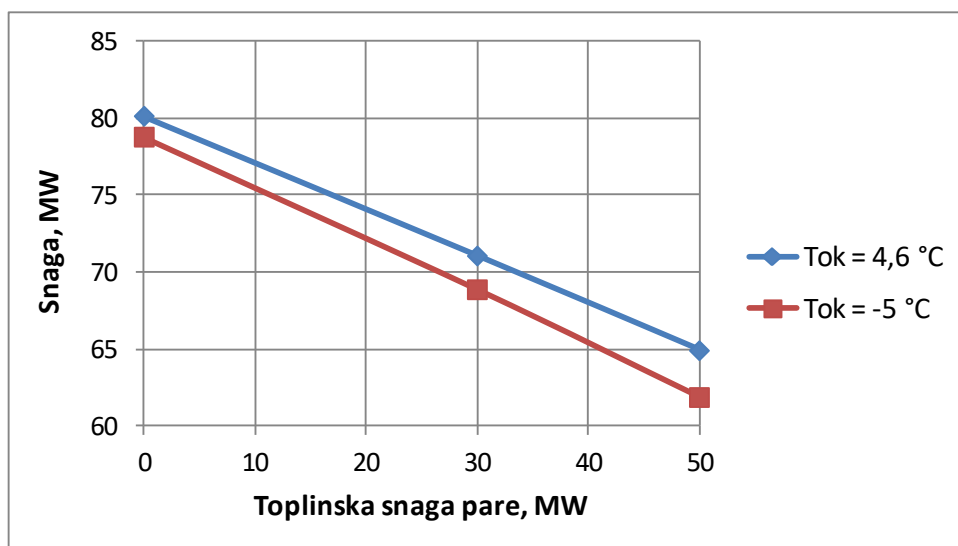
**Slika 4.41: Regulacija temperature pare oduzimanja**

Promjene stupnjeva iskoristivosti kod procesa s oduzimanjem i bez oduzimanja pare u ovisnosti o električnom opterećenju prikazane su slikom 4.42. Električna iskoristivost je veća kod procesa bez oduzimanja pare, ali je ukupna iskoristivost veća kod procesa s oduzimanjem pare te se smanjenjem opterećenja stupnjevi iskoristivosti smanjuju.

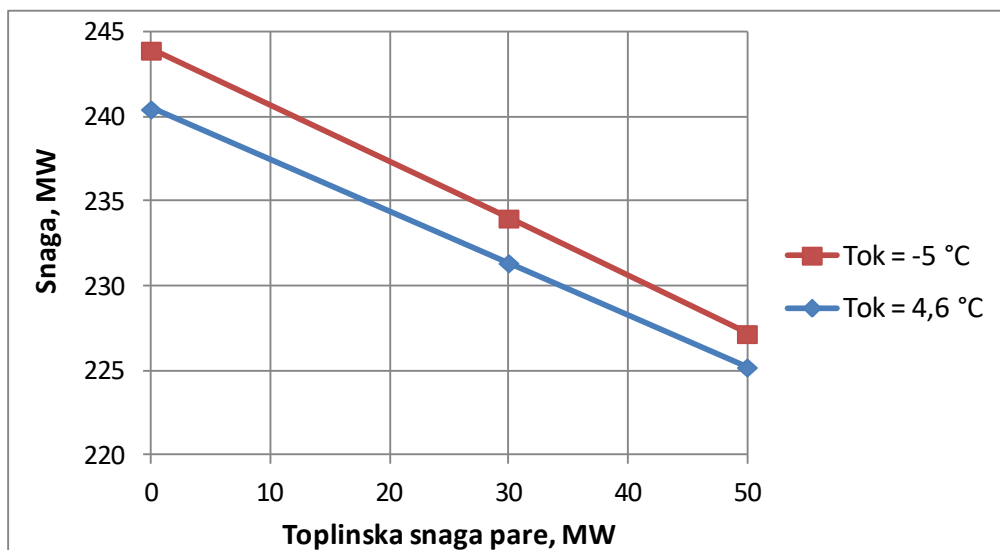


**Slika 4.42: Stupnjevi iskoristivosti s i bez oduzimanja pare pri različitim opterećenjima**

Rezultati dobiveni analizom rada postrojenja promjenom toplinske snage kod različite temperature okolnog zraka prikazani su na sljedećim slikama. Na slikama 4.43 i 4.44 vidi se da se povećanjem toplinske snage, snaga parne turbine i ukupna električna snaga smanjuju, na način kako je prethodno opisano. Snaga parne turbine je kod niže okolišne temperature manja, međutim ukupna je snaga veća (zbog veće snage plinske turbine), a navedeno je detaljno opisano u poglavlju 4.3.2.

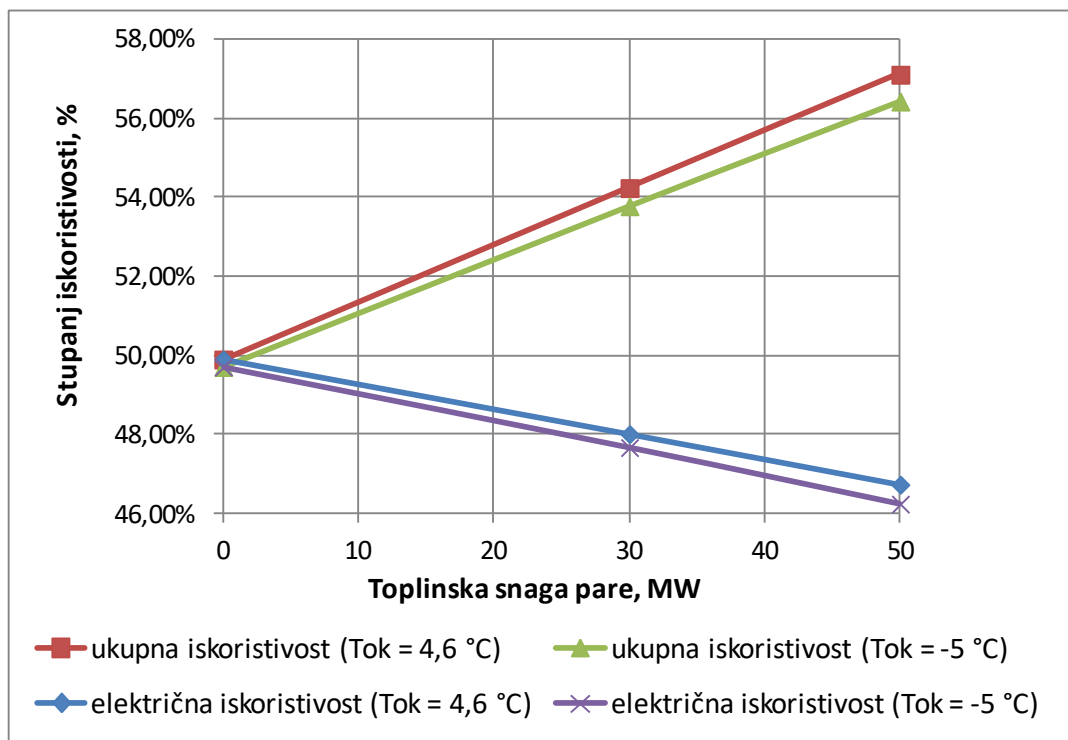


**Slika 4.43: Utjecaj toplinske snage na snagu parne turbine kod različitih temperatura okolnog zraka**



**Slika 4.44: Utjecaj toplinske snage na ukupnu snagu kod različitih temperatura okolnog zraka**

Usporedba električne i ukupne iskoristivosti pri različitim temperaturama okolnog zraka te pri promjeni toplinske snage pare prikazana je slikom 4.45. Veće iskoristivosti postižu se pri višoj okolišnoj temperaturi, međutim razlike između ukupne tj. električne iskoristivosti za različite temperature nisu značajne, a detaljniji utjecaj promjene temperature opisan je u poglavlju 4.3.2.



**Slika 4.45: Utjecaj toplinske snage na iskoristivosti kod različitih temperatura okolnog zraka**

#### 4.5. Proračun emisija

Na izlasku iz plinske turbine, dimni plinovi odlaze u kotao na otpadnu toplinu gdje se koriste za pripremanje pare, te kroz dimnjak izlaze u okolinu. Osim uobičajenih sastojaka ( $N_2$ ,  $CO_2$ ,  $H_2O$ ,  $O_2$ ), u dimnim plinovima pojavljuju se i onečišćujuće tvari. Najvećim dijelom su to dušikovi oksidi ( $NO_x$ ) i ugljikov monoksid ( $CO$ ). Ostale štetne tvari, kao što su sumporov dioksid ( $SO_2$ ) i sitne čestice  $PM_{10}$  pojavljuju se u zanemarivim količinama. Kod izgaranja plinskog goriva, uslijed oslobađanja značajne količine topline dolazi do reakcije molekula dušika i kisika prisutnih u zraku za izgaranje te nastaju termički  $NO_x$ . Maksimalni nastanak termičkih  $NO_x$  javlja se kod siromašnije smjese goriva, zbog viška kisika u zraku [18]. Pri nedovoljnom vremenu zadržavanja na visokim temperaturama ili nepotpunom miješanju, dolazi do nepotpunog izgaranja ugljika iz goriva te nastaje  $CO$ .

Plinska turbina bloka C TE-TO Sisak ima dvije vanjske komore u *dry low*  $NO_x$  izvedbi (DLN), te zadovoljava najbolje raspoložive tehnike za smanjenje emisija [1]. Količina proizvedenih  $NO_x$  ovisi o temperaturi izgaranja te su emisije  $NO_x$  kod nižih temperatura izgaranja smanjene. Plinske turbine s DLN tehnologijom razvijene su kako bi se emisije smanjile bez potrebe za ubrizgavanjem vode ili pare. DLN omogućuje smanjenje emisija  $NO_x$  kroz stupnjevan i stabilni proces izgaranja i jedinstvenu strategiju oslobađanja topline [19].

Zakonom su propisane granične vrijednosti emisija (GVE) za kombinirana postrojenja, te se one odnose na dva plina,  $NO_x$  i  $CO$ . Za ostale tvari se ne propisuju GVE jer su njihove emisije vrlo male. Garantirana vrijednost emisije tj. koncentracija  $CO$  iz plinske turbine bloka C u rasponu od 70% do 100% opterećenja je  $\leq 15$  ppm ( $18,75 \text{ mg/m}^3$ ), a GVE za nova kombi postrojenja bez dodatnog loženja iznosi  $100 \text{ mg/m}^3$ . S obzirom da je garantirana vrijednost manja od granične, može se zaključiti da je uvjet za emisije  $CO$  zadovoljen. Kod zadovoljavanja emisija  $NO_x$  mogu se očekivati problemi, jer je garantirana vrijednost emisija  $NO_x$  iz plinske turbine bloka C u rasponu od 70% do 100% opterećenja  $\leq 25$  ppm ( $51,25 \text{ mg/m}^3$ ), a GVE je  $50 \text{ mg/m}^3$  [1].

Emisije  $NO_x$  i  $CO$  određene su prema sljedećim formulama:

$$q_{m,NO_x} = c_{NO_x} \cdot q_{v,dp} \quad (4.1)$$

$$q_{m,CO} = c_{CO} \cdot q_{v,dp} \quad (4.2)$$

gdje je

$c_{NO_x}$  – koncentracija  $NO_x$  u dimnim plinovima, [ $\text{mg/m}^3$ ]

$c_{CO}$  – koncentracija CO u dimnim plinovima, [mg/m<sup>3</sup>]

$q_{v,dp}$  – volumni protok dimnih plinova, [m<sup>3</sup>/h]

U tablici 4.6 prikazane su izračunate vrijednosti emisija NO<sub>x</sub> i CO za garantirane vrijednosti tj. koncentracije, za kombinirani i kombinirano – kogeneracijski režim rada, u zimskom periodu. U kogeneracijskom režimu rada emisije su nešto manje u odnosu na rad postrojenja bez proizvodnje toplinske energije.

**Tablica 4.6: Emisije NO<sub>x</sub> i CO uz garantirane vrijednosti**

		Kombinirani ciklus	Kombinirani - kogeneracijski pogon
$q_{v,dp}$ [m <sup>3</sup> /h]		2 250 766	2 211 580
	Koncentracija [mg/m <sup>3</sup> ]	$q_m$ [kg/h]	$q_m$ [kg/h]
NO <sub>x</sub>	51,25	115,35	113,34
CO	18,75	42,2	41,47

Rezultati proračuna emisija NO<sub>x</sub> kod različitih opterećenja plinske turbine za karakterističan sat u zimskom razdoblju prikazani su u tablici 4.7, dok tablica 4.8 prikazuje rezultate za ljetno razdoblje. U zimskom razdoblju je pretpostavljen kogeneracijski režim rada pa je zato ukupna proizvedena energija veća u odnosu na ljetno razdoblje. Iz tablice 4.7 vidi se da sa porastom opterećenja emisije NO<sub>x</sub> ( $m_{NOx}$ ) rastu, te su one kod 100% opterećenja 14,9% veće u odnosu na emisije kod 70% opterećenja. Međutim kako se povećanjem opterećenja maseni protok goriva povećava više od emisija (kod 100% opterećenja je 20,58% veći u odnosu na onaj kod 70% opterećenja) slijedi da će se emisije po toni goriva smanjivati. Za emisije po MWh proizvedene energije vrijedi isto tj. emisije su manje pri većem opterećenju.

**Tablica 4.7: Emisije NO<sub>x</sub> kod različitih opterećenja za zimsko razdoblje**

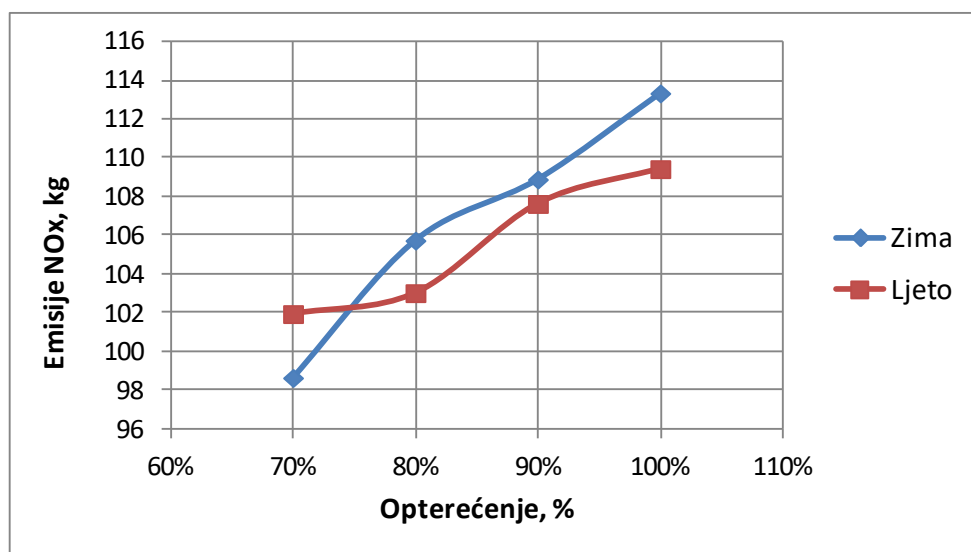
Opt. [%]	$m_g$ [t]	$E_{uk}$ [MWh]	$V_{dp}$ [m <sup>3</sup> ]	$m_{NOx}$ [kg]	$\frac{m_{NOx}}{m_g}$ [kg/t]	$\frac{m_{NOx}}{E_{uk}}$ [kg/MWh]
70	29,59	233,81	1925049	98,66	3,334	0,441
80	31,97	243,49	2063325	105,75	3,307	0,434
90	33,73	261,42	2124842	108,9	3,228	0,417
100	35,68	279,81	2211580	113,34	3,177	0,405



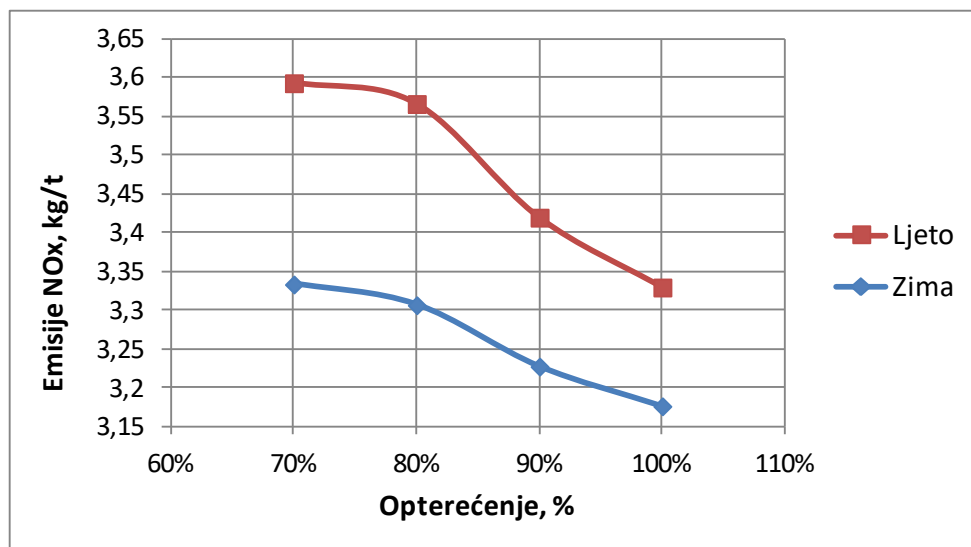
Iz tablice 4.8 može se vidjeti da se u ljetnom razdoblju, promjenom opterećenja emisije mijenjaju na sličan način kao i u zimskom razdoblju. Međutim, ukupne su emisije (slika 4.46) u ljetnom razdoblju manje nego u zimskom (osim za 70% opterećenja), a emisije po toni goriva (slika 4.47) i po MWh proizvedene energije (slika 4.48) veće, zbog manje potrošnje goriva i manje proizvedene energije u ljetnom razdoblju.

**Tablica 4.8: Emisije NO<sub>x</sub> kod različitih opterećenja za ljetno razdoblje**

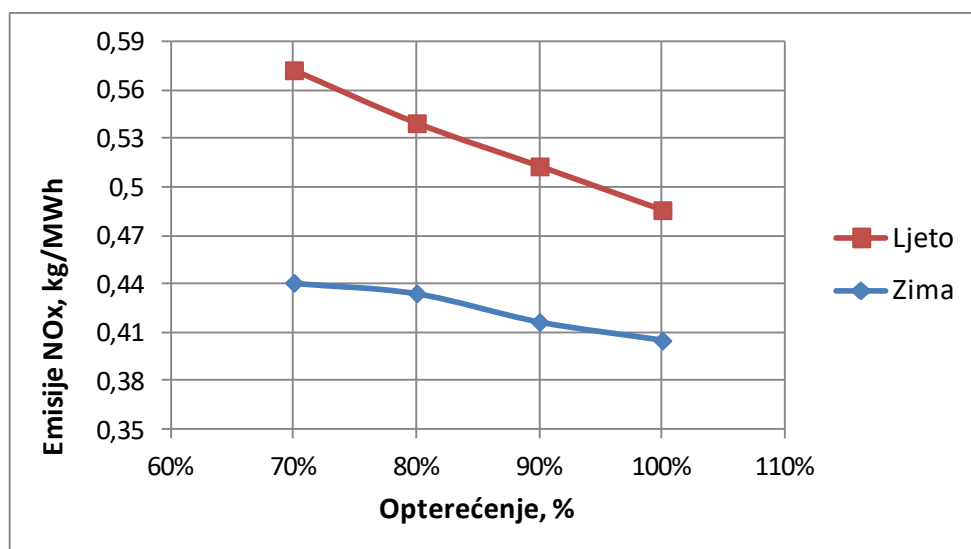
<b>Opt.</b> [%]	<b><math>m_g</math></b> [t]	<b><math>E_{uk}</math></b> [MWh]	<b><math>V_{dp}</math></b> [m <sup>3</sup> ]	<b><math>m_{NOx}</math></b> [kg]	<b><math>\frac{m_{NOx}}{m_g}</math></b> [kg/t]	<b><math>\frac{m_{NOx}}{E_{uk}}</math></b> [kg/MWh]
70	28,37	178,10	1989360	101,95	3,594	0,572
80	28,89	190,92	2010427	103,03	3,567	0,540
90	31,47	209,85	2100254	107,64	3,420	0,513
100	32,86	225,25	2135308	109,43	3,330	0,486



**Slika 4.46: Emisije NO<sub>x</sub> za karakterističan sat u zimskom i ljetnom razdoblju u ovisnosti o opterećenju**

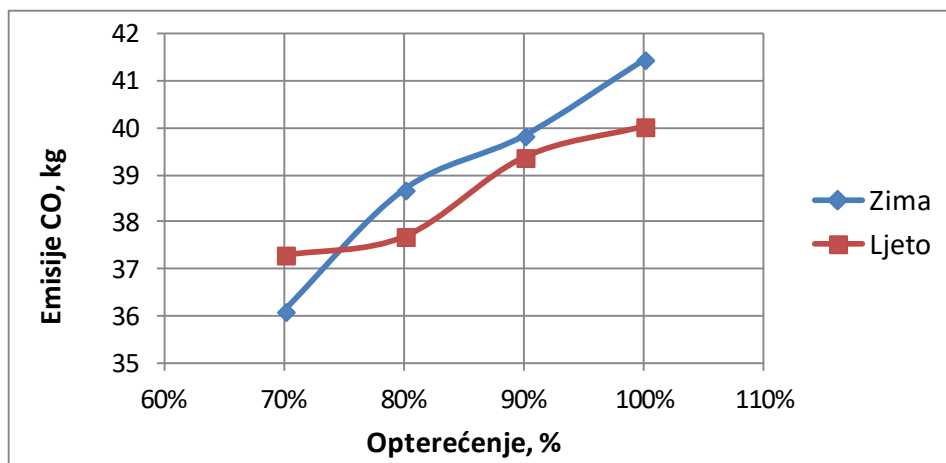


Slika 4.47: Emisije NO<sub>x</sub> po toni goriva u zimskom i ljetnom razdoblju u ovisnosti o opterećenju

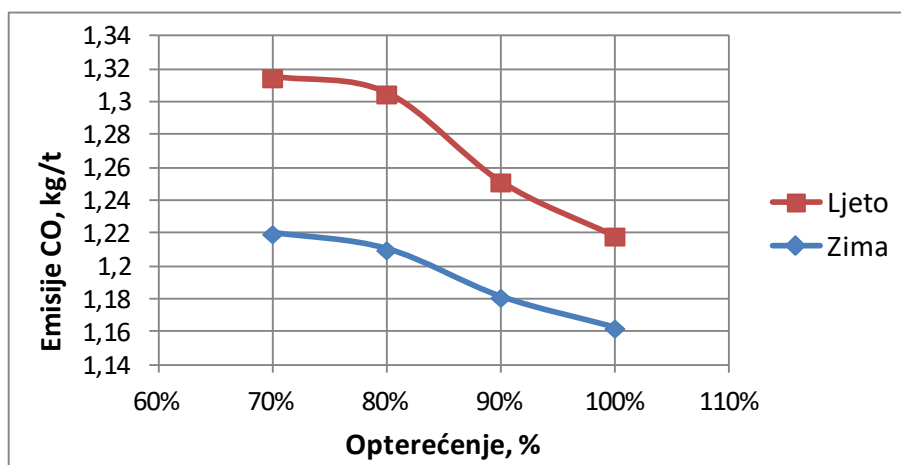


Slika 4.48: Emisije NO<sub>x</sub> po MWh proizvedene energije u zimskom i ljetnom razdoblju u ovisnosti o opterećenju

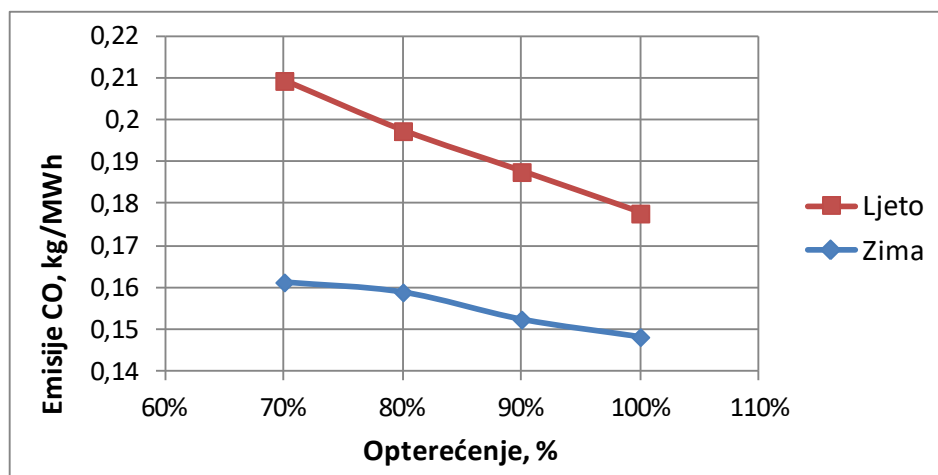
Na slikama 4.49, 4.50 i 4.51 prikazani su rezultati za emisije CO te se vidi da se one mijenjaju slično kao i emisije NO<sub>x</sub>.



Slika 4.49: Emisije CO za karakterističan sat u zimskom i ljetnom razdoblju u ovisnosti o opterećenju



Slika 4.50: Emisije CO po toni goriva u zimskom i ljetnom razdoblju u ovisnosti o opterećenju



Slika 4.51: Emisije CO po MWh proizvedene energije u zimskom i ljetnom razdoblju u ovisnosti o opterećenju

Emisije ugljikovog dioksida ( $\text{CO}_2$ ) određene su prema masenom udjelu  $\text{CO}_2$  u dimnim plinovima. Maseni udjeli sastojaka u dimnim plinovima za različita razdoblja prikazani su u tablici 4.9. Može se vidjeti da je ljeti nešto veći maseni udio vodene pare te manji udio dušika u dimnim plinovima, dok se ostali udjeli neznatno razlikuju. Tablica 4.10 prikazuje masene udjele za 100% i 70% opterećenja plinske turbine u ljetnom razdoblju. Maseni udio kisika i dušika je veći kod smanjenog opterećenja, a maseni udio vodene pare i ugljikovog dioksida manji.

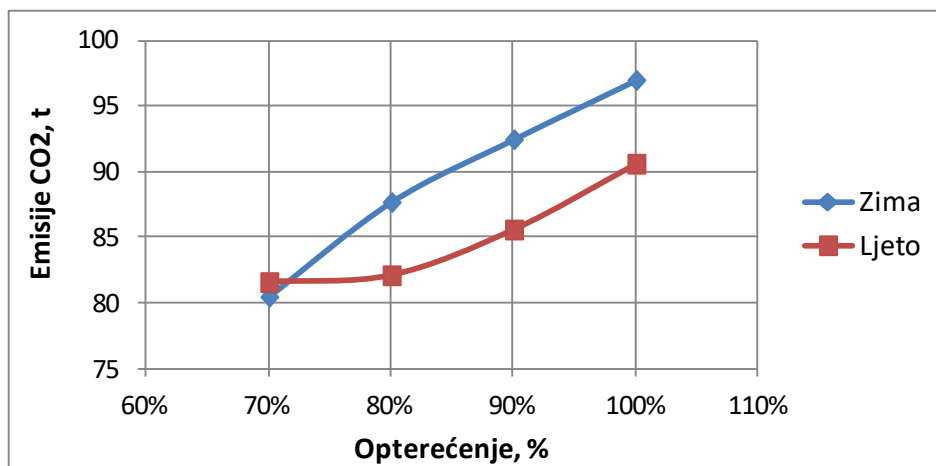
**Tablica 4.9: Sastav dimnih plinova za zimsko i ljetno razdoblje**

<b>Sastojak</b>	<b>Maseni udio (Zima)</b>	<b>Maseni udio (Ljeto)</b>
$\text{N}_2$	0,739	0,734
$\text{O}_2$	0,155	0,156
$\text{H}_2\text{O}$	0,043	0,049
$\text{CO}_2$	0,0494	0,048

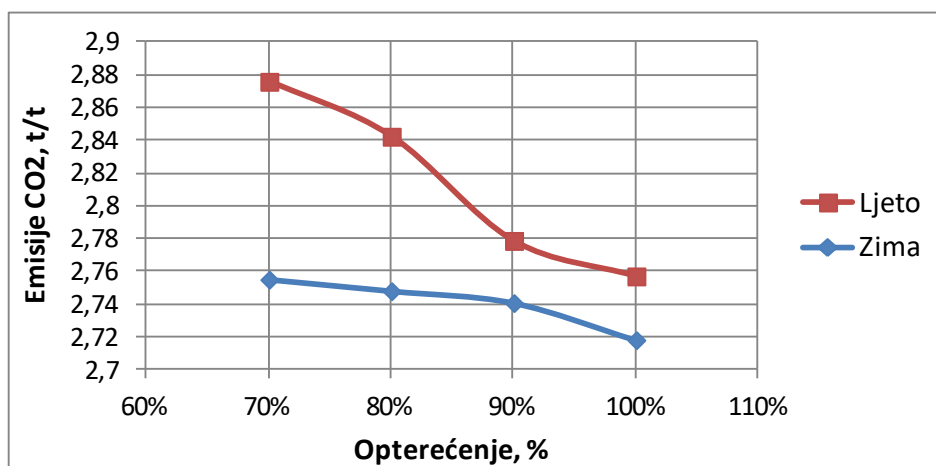
**Tablica 4.10: Sastav dimnih plinova za različita opterećenja**

<b>Sastojak</b>	<b>Maseni udio (100% opterećenja)</b>	<b>Maseni udio (70% opterećenja)</b>
$\text{N}_2$	0,734	0,735
$\text{O}_2$	0,156	0,162
$\text{H}_2\text{O}$	0,049	0,046
$\text{CO}_2$	0,048	0,044

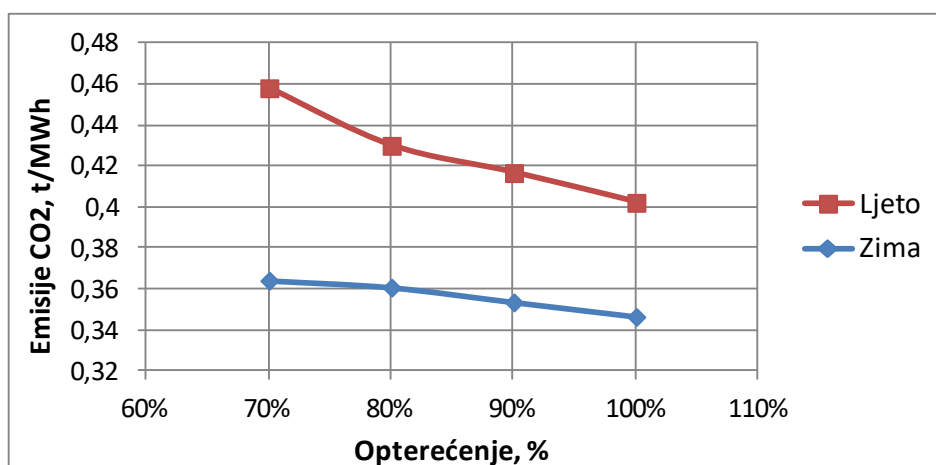
Na slici 4.52 prikazane su emisije  $\text{CO}_2$  za karakterističan sat u zimskom i ljetnom razdoblju te su i ovdje emisije zimi veće, osim kod 70% opterećenja. Nadalje slika 4.53 prikazuje emisije  $\text{CO}_2$  po toni izgoranog goriva te se emisije smanjuju povećanjem opterećenja. Emisija  $\text{CO}_2$  po MWh proizvedene električne energije isto se smanjuju povećanjem opterećenja, što prikazuje slika 4.54.



Slika 4.52: Emisije CO<sub>2</sub> za karakterističan sat u zimskom i ljetnom razdoblju u ovisnosti o opterećenju



Slika 4.53: Emisije CO<sub>2</sub> po toni goriva u zimskom i ljetnom razdoblju u ovisnosti o opterećenju



Slika 4.54: Emisije CO<sub>2</sub> po MWh proizvedene energije u zimskom i ljetnom razdoblju u ovisnosti o opterećenju

Tablica 4.11 prikazuje emisije izračunate za predviđeni godišnji rad postrojenja od 7500 sati. Godina je podijeljena na zimsko, prijelazno i ljetno razdoblje te su u zimskom razdoblju emisije najveće, jer je pretpostavljen najveći broj radnih sati u tom razdoblju. Dodatno je pretpostavljeno da postrojenje u noćnim satima radi na 70% opterećenja, a danju na maksimalnom kapacitetu.

Ukupne emisije dušikovih oksida iznose 801,603 tona godišnje, emisije ugljikovog monoksida 293,072 tona godišnje, a emisije ugljikovog dioksida 664597 tona godišnje. Stvarna vrijednost emisija određuje se mjerenjem na postrojenju.

**Tablica 4.11: Godišnje emisije**

<b>Razdoblje</b>	<b>Sati rada [h/god]</b>	<b>NO<sub>x</sub> [t/god]</b>	<b>CO [t/god]</b>	<b>CO<sub>2</sub> [t/god]</b>
Zimsko	4000	428,899	156,914	362165
Prijelazno	1900	202,055	73,923	163481
Ljetno	1600	170,109	62,235	138951
<b>UKUPNO</b>	<b>7500</b>	<b>801,063</b>	<b>293,072</b>	<b>664597</b>

## 5. VISOKOUČINKOVITA KOGENERACIJA

Prema Zakonu o obnovljivim izvorima energije i visokoučinkovitoj kogeneraciji, visokoučinkovita kogeneracija (VUK) je kogeneracijsko postrojenje koje osigurava uštedu primarne energije (UPE) od najmanje 10% u usporedbi s referentnom odvojenom proizvodnjom električne i toplinske energije, odnosno koje osigurava bilo kakvu uštedu primarne energije u slučaju kogeneracijskog postrojenja čija instalirana električna priključna snaga ne premašuje 1 MW te zadovoljava uvjete učinkovitosti i/ili korištenja topline prema Pravilniku o obnovljivim izvorima energije i visokoučinkovitoj kogeneraciji [20].

### 5.1. *Pravilnik o obnovljivim izvorima energije i visokoučinkovitoj kogeneraciji*

Da bi postrojenje steklo status povlaštenog proizvođača električne energije mora zadovoljiti sljedeće tehničke i pogonske uvjete prema Pravilniku o obnovljivim izvorima energije i visokoučinkovitoj kogeneraciji [21]:

- 1) Proizvodno postrojenje za stjecanje statusa povlaštenog proizvođača električne energije mora biti priključeno na elektroenergetsku prijenosnu ili distribucijsku mrežu te sukladno ugovoru o korištenju mreže mora imati mogućnost isporuke električne energije u elektroenergetsku mrežu.
- 2) Neto isporučena električna energija proizvodnog postrojenja se utvrđuje kao razlika ukupno isporučene električne energije u elektroenergetsku mrežu i ukupno preuzete električne energije iz elektroenergetske mreže evidentirane na svim obračunskim mjernim mjestima na mjestu priključka proizvodnog postrojenja na elektroenergetsku mrežu.
- 3) Ako proizvodno postrojenje koristi sustav za pohranu, odnosno skladištenje električne energije, nužno je osigurati mjerenje električne energije koja se pohranjuje i isporučuje iz skladišta energije.
- 4) Ako proizvodno postrojenje proizvodi električnu i toplinsku energiju, na proizvodnom postrojenju se mora osigurati mjerenje veličina potrebnih za provjeru učinkovitosti proizvodnog postrojenja.
- 5) Mjerenja toplinske energije trebaju obuhvatiti toplinsku energiju koja se koristi u samom procesu proizvodnje električne energije (vlastita potrošnja toplinske energije),

toplinsku energiju koja se korisno troši na samoj lokaciji (vlastite potrebe za toplinskom energijom) i toplinsku energiju koja se isporučuje drugim osobama.

- 6) Ukoliko postoji dodatna proizvodnja toplinske energije ili ulaz toplinske energije u postrojenje, nužno je osigurati odgovarajuća mjerenja ulazne toplinske energije.

**Način stjecanja statusa povlaštenog proizvođača [21]:**

- 1) Status povlaštenog proizvođača električne energije stječe se na temelju rješenja Hrvatske energetske regulatorne agencije (HERA-e) koje se izdaje temeljem zahtjeva elektroenergetskog subjekta ili druge pravne ili fizičke osobe za proizvodno postrojenje ili proizvodnu jedinicu koje ispunjava uvjete utvrđene Zakonom i Pravilnikom o OIE i VUK.

Uz zahtjev za izdavanje rješenja o stjecanju statusa povlaštenog proizvođača potrebno je priložiti sljedeće dokumente [21]:

- izvadak iz odgovarajućeg registra odnosno druge institucije nadležne za registraciju
- uporabna dozvola
- ugovor o korištenju mreže
- tehnički opis proizvodnog postrojenja
- elaborat o ugrađenim mjernim uređajima
- godišnji plan proizvodnje za prvu godinu korištenja proizvodnog postrojenja
- godišnji plan proizvodnje za prvu cijelu kalendarsku godinu korištenja proizvodnog postrojenja
- za proizvodna postrojenja koja se već koriste ili su rekonstruirana potrebno je dostaviti i dokaze o datumu izgradnje i početku rada proizvodnog postrojenja
- dokaz o uplati naknade za izdavanje rješenja
- potvrda porezne uprave o plaćanju svih dospjelih poreznih obveza i obveza za mirovinsko i zdravstveno osiguranje i druga javna davanja
- javnobilježnički ovjerena izjava o nekažnjavanju
- javnobilježnički ovjerena izjava kupca toplinske energije o planiranom korištenju toplinske energije kupljene od povlaštenog proizvođača, kojom se potvrđuje sljedeće:



1. da će se toplinska energija preuzeta od povlaštenog proizvođača koristiti na okolišno prihvatljiv i održiv način te će biti iskorištena u gospodarske svrhe s pažnjom dobrog gospodarstvenika i pažnjom dobrog stručnjaka
2. za koje svrhe se koristi toplinska energija preuzeta od povlaštenog proizvođača
3. da li se toplinska energija preuzeta od povlaštenog proizvođača koristi za proizvodnju električne energije
4. očekivana godišnja i mjesečna potrošnja toplinske energije

Izjava o planiranom korištenju toplinske energije kupljene od povlaštenog proizvođača ne dostavlja se u slučaju isporuke toplinske energije u centralizirani toplinski sustav.

**Rješenje o stjecanju statusa povlaštenog proizvođača električne energije [21]:**

- 1) HERA izdaje rješenje o stjecanju statusa povlaštenog proizvođača električne energije na rok važenja od 5 godina.
- 2) Rješenje o stjecanju statusa povlaštenog proizvođača električne energije minimalno sadrži podatke o povlaštenom proizvođaču, proizvodnom postrojenju i proizvodnim jedinicama te rok važenja na koje se rješenje izdaje.
- 3) Za proizvodna postrojenja za koje postoje uvjeti učinkovitosti, rješenje o stjecanju statusa povlaštenog proizvođača električne energije sadrži i uvjete učinkovitosti koje povlašteni proizvođač mora održavati.
- 4) Za proizvodna postrojenja za koje postoje uvjeti korištenja sirovine, odnosno goriva, rješenje o stjecanju statusa povlaštenog proizvođača električne energije sadrži i uvjete koje povlašteni proizvođač mora održavati pri korištenju sirovine, odnosno goriva.
- 5) Za izgrađena proizvodna postrojenja, rješenje o stjecanju statusa povlaštenog proizvođača električne energije mora sadržavati i podatke o starosti proizvodnog postrojenja.
- 6) Rješenje o stjecanju statusa povlaštenog proizvođača električne energije se izdaje za cijelo proizvodno postrojenje.
- 7) Ukoliko se status povlaštenog proizvođača električne energije stekao za jednu ili više proizvodnih jedinica, tada Rješenje o stjecanju statusa povlaštenog proizvođača električne energije sadrži podatke o proizvodnim jedinicama te uvjetima korištenja pojedinih proizvodnih jedinica.

**Dužnosti povlaštenog proizvođača električne energije [21]:**

1. Povlaštenu proizvođač dužan je svake godine, do 30. rujna, dostaviti operatoru tržišta električne energije i HERA-i godišnji plan proizvodnje za sljedeću kalendarsku godinu za proizvodno postrojenje za koje je ishodio rješenje.
2. Povlaštenu proizvođač, koji mora zadovoljavati uvjete učinkovitosti ili uvjete korištenja goriva, dužan je HERA-i dostaviti izvješće o ostvarenju godišnjih planova proizvodnje za prethodnu godinu za proizvodno postrojenje za koje je ishodio rješenje, najkasnije do kraja veljače tekuće godine.
3. Povlaštenu proizvođač dužan je u pisanom obliku obavijestiti HERA-u o svakoj planiranoj promjeni tehničko-tehnoloških značajki i/ili uvjeta korištenja postrojenja, promjeni sheme ili načina provedbe mjerenja i to najkasnije 60 dana prije poduzimanja planiranog zahvata.

***5.1.1. Uvjeti korištenja toplinske energije u proizvodnim postrojenjima koja istovremeno proizvode električnu i toplinsku energiju [21]***

Korisnom toplinom iz kogeneracijskog postrojenja smatra se:

- toplina koja se koristi za procesno ili prostorno grijanje i/ili za naknadno hlađenje,
- toplina za centralizirano grijanje/hlađenje te
- toplina za izravno grijanje i sušenje korištenjem ispušnih plinova iz kogeneracijskog postrojenja.

Korištenje proizvedene toplinske energije za dodatnu proizvodnju električne energije:

- Toplinska energija nastala proizvodnjom električne energije, a koja se isporučuje radi proizvodnje električne energije u drugom proizvodnom postrojenju ili drugoj proizvodnoj jedinici, ne smatra se korisno iskorištenom toplinskom energijom, nego se smatra dijelom unutarnjeg prijenosa topline u proizvodnoj jedinici.
- U slučaju kada se toplinska energija iz proizvodnog postrojenja isporučuje drugoj osobi, pri čemu se ta toplinska energija koristi u svrhu proizvodnje električne energije, tada se toplinska energija predana drugoj osobi kao i proizvedena električna energija u proizvodnom postrojenju druge osobe uzimaju u određivanje učinkovitosti proizvodnog postrojenja kao da se radi o dodatnoj proizvodnji povlaštenog proizvođača, odnosno toplinska energija predana drugoj osobi i proizvedena električna

energija u proizvodnom postrojenju druge osobe smatraju se dijelom unutarnjeg prijenosa topline u proizvodnoj jedinici.

Korištenje proizvedene toplinske energije za vlastitu potrošnju:

- Toplina povratnog medija (kondenzata ili vode) koji se koristi za isporuku topline u centralni toplinski sustav ili zatvoreni toplinski sustav ne predstavlja korisnu toplinu.

Korisnom toplinom iz kogeneracijskog procesa ne smatra se:

- toplina ispuštena u okoliš bez ikakve korisne uporabe,
- toplina koja se izgubi kroz dimnjake ili ispušne cijevi,
- toplina koja se ispušta putem kondenzatora ili drugih uređaja za odvođenje topline,
- toplina koja se koristi za otplinjavanje ili odzračivanje, kao i za regenerativno zagrijavanje kondenzata, dodatne vode i napojne vode i koja se koristi u kogeneracijskom postrojenju (npr. u kotlu na otpadnu toplinu).

Korisnom toplinom iz kogeneracijskog procesa također se ne smatraju gubici toplinske energije u kogeneracijskom postrojenju te toplina proizvedena u kogeneracijskom postrojenju čija potražnja nije ekonomski opravdana.

### 5.1.2. Postupak određivanja uštede primarne energije za kogeneracijska postrojenja

Vrijednosti koje se koriste za izračun uštede primarne energije određuju se na temelju očekivanog ili stvarnog rada proizvodne jedinice u uobičajenim pogonskim uvjetima. Iznos uštede primarne energije kod kogeneracijskog postrojenja određuje se prema [21]:

$$UPE = \left( 1 - \frac{1}{\frac{\eta_{H,CHP}}{\eta_{H,Ref}} + \frac{\eta_{E,CHP}}{\eta_{E,Ref}}} \right) \cdot 100\% \quad (5.1)$$

pri čemu:

- $UPE$  označava uštedu primarne energije te mora iznositi najmanje 10% u odnosu na referentne vrijednosti za odvojenu proizvodnju toplinske i električne energije;
- $\eta_{H,CHP}$  označava učinkovitost toplinske energije iz kogeneracijske proizvodnje definiranu kao godišnja proizvodnja korisne topline podijeljena s utroškom goriva za proizvodnju zbroja korisne topline i električne energije iz kogeneracije;
- $\eta_{H,Ref}$  označava referentnu učinkovitost za odvojenu proizvodnju toplinske energije;

- $\eta_{E,CHP}$  označava učinkovitost električne energije iz kogeneracijske proizvodnje definiranu kao godišnja električna energija iz kogeneracije podijeljena s utroškom goriva za proizvodnju zbroja ukupne korisne topline i električne energije iz kogeneracije. Tamo gdje kogeneracijska jedinica proizvodi mehaničku energiju, godišnja električna energija iz kogeneracije može se povećati dodatnim elementom koji predstavlja količinu električne energije koja je jednaka količini mehaničke energije;
- $\eta_{E,Ref}$  označava referentnu učinkovitost za odvojenu proizvodnju električne energije.

Za postrojenja čija je snaga veća od 25 MW te ukupna učinkovitost veća od 70%, sva proizvedena električna energija priznaje se kao kogeneracijska pa se uštede primarne energije izračunavaju alternativnom metodom prema (5.1) tako da se „ $\eta_{H,CHP}$ “ zamijeni s „ $\eta_H$ “, a „ $\eta_{E,CHP}$ “ s „ $\eta_E$ “, pri čemu:

$\eta_H$  označava učinkovitost toplinske energije postupka, definiranu kao godišnja proizvodnja topline podijeljena s utroškom goriva za dobivanje zbroja proizvodnje toplinske i električne energije;

$\eta_E$  označava učinkovitost električne energije postupka, definiranu kao godišnja proizvodnja ukupne električne energije podijeljena s utroškom goriva za dobivanje zbroja proizvodnje toplinske i električne energije.

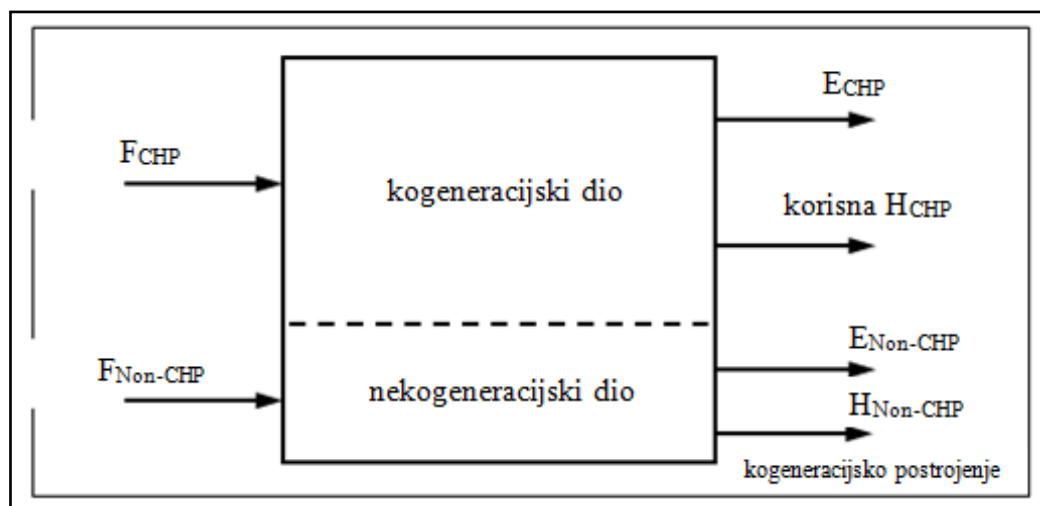
### 5.1.3. Određivanje električne energije proizvedene u kogeneracijskom postrojenju

Električna energija proizvedena u kogeneracijskom postrojenju za potrebe izračuna UPE može se odrediti na jedan od sljedećih načina [21]:

- 1) Sva proizvedena električna energija priznaje se kao kogeneracijska ukoliko su ispunjeni kriteriji ukupne učinkovitosti: 80% za kombinirani proces plinske i parne turbine kao i za kondenzacijske parne turbine s oduzimanjem pare, odnosno 75% za ostale tehnologije.
- 2) Ako kriteriji učinkovitosti nisu ispunjeni primijenit će se izračun električne energije proizvedene u kogeneraciji prema stvarnom ili teoretskom omjeru električne i toplinske energije i prema smjernicama iz Odluke 2008/952/EC.

### 5.1.3.1. Izračun električne energije iz kogeneracije prema stvarnom ili teoretskom omjeru električne i toplinske energije [21]

Ako je sva isporučena toplina iz kogeneracijskog postrojenja korisna toplina onda je pogon postrojenja isključivo kogeneracijski te je sva proizvedena električna energija kogeneracijska. Za slučajeve u kojima postrojenje nije u isključivom kogeneracijskom pogonu potrebno je razdvojiti kogeneracijsku od nekogeneracijske proizvodnje, što je prikazano na slici 5.1.



Slika 5.1: Energetska bilanca postrojenja s djelomičnim kogeneracijskim pogonom

Izračun kogeneracijske električne energije obuvaca sljedeće korake:

1. određivanje ukupne učinkovitosti (iskoristivosti) kogeneracijskog postrojenja kao omjera proizvedene energije (zbroj električne i mehaničke energije te korisne topline) i utrošenog goriva na temelju pogonskih podataka u razdoblju izvješćivanja (godišnje, mjesečno ili kraće) – uz ukupnu određuju se i električna i toplinska učinkovitost (iskoristivost) postrojenja;
2. ukoliko je ukupna učinkovitost veća od propisanih pragova (ovisno o tehnologiji 75% ili 80%) sva proizvedena električna energija i isporučena korisna toplina smatraju se kogeneracijskom;
3. ako je ukupna učinkovitost kogeneracijskog postrojenja manja od propisanih pragova kogeneracijsko postrojenje dijeli se na dva virtualna dijela – za istodobnu i za odvojenu proizvodnju električne i toplinske energije te se na temelju izmjerenih ili projektnih (za postrojenja u izgradnji ili u prvoj godini pogona) podataka o omjeru električne i toplinske energije  $C$ , određuje kogeneracijska električna energija  $E_{CHP}$  prema jednadžbi:

$$E_{CHP} = C_{stvarno(projektno)} \cdot H_{CHP} \quad (5.2)$$

4. ukoliko stvarni ili projektni omjer električne i toplinske energije nije poznat koristi se tablična odnosno zadana vrijednost omjera (tablica 5.1) te određuje kogeneracijska električna energija prema:

$$E_{CHP} = C_{zadano} \cdot H_{CHP} \quad (5.3)$$

**Tablica 5.1: Zadani omjer električne i toplinske energije ovisno o tipu tehnologije**

<b>Tehnologija</b>	<b>Zadani omjer električne i toplinske energije, <math>C_{zadano}</math></b>
Kombinirani proces plinske i parne turbine	0,95
Protutlačna parna turbina	0,45
Kondenzacijska parna turbina s oduzimanjem pare	0,45
Plinska turbina s iskorištavanjem otpadne topline	0,55
Motor s unutarnjim izgaranjem	0,75

5. izračunata vrijednost kogeneracijske električne energije  $E_{CHP}$  koristi se za određivanje nekogeneracijske električne energije  $E_{Non-CHP}$ , tako da se od ukupne proizvedene električne energije  $E_{el}$  oduzme kogeneracijska električna energija:

$$E_{Non-CHP} = E_{el} - E_{CHP} \quad (5.4)$$

6. Energija utrošenog goriva u nekogeneracijskoj proizvodnji  $F_{Non-CHP}$  izračunava se kao omjer nekogeneracijske električne energije i učinkovitosti proizvodnje električne energije postrojenja;
7. Energija utrošenog goriva u kogeneracijskoj proizvodnji  $F_{CHP}$  izračunava se kao razlika između ukupno utrošenog goriva  $F$  i goriva utrošenog u nekogeneracijskoj proizvodnji  $F_{Non-CHP}$ ;
8. izračunate vrijednosti  $F_{CHP}$  i  $E_{CHP}$  zajedno s izmjerenom korisnom toplinom  $H_{CHP}$  koriste se za određivanje uštede primarne energije ( $UPE$ ) prema jednadžbi (5.1).

#### 5.1.4. Određivanje ukupne godišnje učinkovitosti za kogeneracijska postrojenja

Ukupna proizvedena energija u kogeneracijskom postrojenju  $E_{uk}$  jednaka je [21]:

$$E_{uk} = E_{el} + H_{CHP} + E_{meh} \quad (5.5)$$

gdje je

$E_{el}$  – ukupna godišnja proizvedena električna energija,

$H_{CHP}$  – godišnja korisna toplinska energija iz kogeneracijskog postrojenja,

$E_{meh}$  – ukupna godišnja proizvedena mehanička energija.

Ukupna godišnja proizvedena električna energija  $E_{el}$  obuhvaća električnu energiju proizvedenu u kogeneracijskom procesu te električnu energiju proizvedenu u odvojenoj proizvodnji toplinske i električne energije.

Ukupna mehanička energija  $E_{meh}$  smatra se termodinamički jednakovrijednom električnoj energiji s faktorom 1.

Ukupna godišnja učinkovitost jednaka je omjeru ukupne proizvedene energije u kogeneracijskom postrojenju  $E_{uk}$  i energije utrošenog goriva  $Q_g$  [21]:

$$\eta_{uk} = \frac{E_{uk}}{Q_g} \quad (5.6)$$

Energija utrošenog goriva uključuje energiju goriva koje se koristi u kogeneracijskoj i nekogeneracijskoj proizvodnji. Gorivo u kogeneracijskom procesu je bilo koja vrsta gorive tvari, para i drugi oblici ulazne toplinske energije, uključujući otpadnu toplinu za proizvodnju električne energije.

## 5.2. Izračun uštede primarne energije za postojeće postrojenje

Ušteda primarne energije za postojeće postrojenje odredit će se uz određene pretpostavke. Ukupna proizvedena električna i toplinska energija te energija utrošenog goriva proračunat će se za predviđeni godišnji program rada postrojenja dan u tablici 5.2.

**Tablica 5.2: Godišnji program rada postrojenja**

Režim rada	Angažman [h/god]
Kombinirani ciklus	7500
Kogeneracijski pogon	4000

U poglavlju 4.1. dani su rezultati za različita razdoblja, pomoću kojih će se odrediti predviđena godišnja potrošnja goriva te proizvodnja električne i toplinske energije. Pretpostavljeno je da u vremenu od 7 do 21 sat (ukupno 14 h) postrojenje radi na 100% opterećenja, a od 21 do 7 sati (ukupno 10 h) na 70% opterećenja zbog smanjene potrošnje.

U zimskom razdoblju se proizvodi i toplinska energija za potrebe CTS-a, koji radi od 5 do 23 sata. Kako u periodu od 23 do 5 sati nema proizvodnje toplinske energije nešto je veća proizvodnja električne energije.

Tablica 5.3 prikazuje sate rada, izračunatu utrošenu energiju goriva te proizvedenu električnu i toplinsku energiju po razdobljima. Navedeni podaci koristit će se kod izračuna uštede primarne energije. Važno je napomenuti da se za izračun uštedu primarne energije moraju koristiti stvarni podaci izmjereni na postrojenju u kalendarskoj godini, ali kako oni nisu dostupni, izračun će se provesti pomoću podataka iz tablice 5.3.

**Tablica 5.3: Utrošena i proizvedena energija u postojećem postrojenju**

<b>Razdoblje</b>	<b>Sati rada [h/god]</b>	<b>Utrošena energija goriva, [GWh]</b>	<b>Električna energija, [GWh]</b>	<b>Toplinska energija, [GWh]</b>
Zimsko	4000	1823,82	840,66	200
Prijelazno	1900	828,64	402,66	0
Ljetno	1600	681,84	328,83	0
<b>UKUPNO</b>	<b>7500</b>	<b>3334,30</b>	<b>1572,15</b>	<b>200</b>

Iz formule (5.6) određuje se ukupna godišnja učinkovitosti postrojenja:

$$\eta_{uk} = \frac{E_{uk}}{Q_g} = \frac{E_{el} + H_{CHP}}{Q_g} = \frac{1572,15 + 200}{3334,30} = 0,53149 = 53,15\%$$

Izračunat će se i godišnja električna i toplinska iskoristivost:

$$\eta_{el} = \frac{E_{el}}{Q_g} = \frac{1572,15}{3334,30} = 0,4715 = 47,15\%$$

$$\eta_t = \frac{H_{CHP}}{Q_g} = \frac{200}{3334,30} = 0,0599 = 6\%$$

U zimskom razdoblju toplinska iskoristivost iznosi 10,97%, a ukupna 57,06%.

S obzirom da je ukupna godišnja učinkovitost manja od propisane, ne može se sva električna energija priznati kao kogeneracijska pa se daljnji izračun mora provesti prema zadanom omjeru električne i toplinske energije jer stvarni omjer nije poznat. Taj omjer za kombinirani proces plinske i parne turbine iznosi  $C = 0,95$  (tablica 5.1) pa iz jednadžbe (5.3) slijedi kogeneracijska električna energija:

$$E_{CHP} = C_{zadano} \cdot H_{CHP} = 0,95 \cdot 200 = 190 \text{ GWh}$$



Nekogeneracijska električna energija, tj. električna energija koja ne ulazi u sustav poticaja određuje se prema (5.4):

$$E_{Non-CHP} = E_{el} - E_{CHP} = 1572,15 - 190 = 1382,15 \text{ GWh}$$

Iz navedenog se može odrediti da će se poticati samo 12,09% od ukupno proizvedene električne energije te je jasno da se moraju provesti određene mjere poboljšanja, ukoliko se želi dobiti poticaj za veći udio električne energije, odnosno za cjelokupno postrojenje.

Energija utrošenog goriva u nekogeneracijskoj proizvodnji izračunat će se prema:

$$F_{Non-CHP} = \frac{E_{Non-CHP}}{\eta_{el}} = \frac{1382,15}{0,4715} = 2931,39 \text{ GWh}$$

Energija utrošenog goriva u kogeneracijskoj proizvodnji određuje se prema:

$$F_{CHP} = F - F_{Non-CHP} = 3334,30 - 2931,39 = 402,91 \text{ GWh}$$

Nadalje se mogu odrediti električna i toplinska učinkovitost iz kogeneracijske proizvodnje:

$$\eta_{E,CHP} = \frac{E_{CHP}}{F_{CHP}} = \frac{190}{402,91} = 0,4716 = 47,16\%$$

$$\eta_{H,CHP} = \frac{H_{CHP}}{F_{CHP}} = \frac{200}{402,91} = 0,4964 = 49,64\%$$

Za određivanje uštede primarne energije potrebno je poznavati i referentne učinkovitosti za odvojenu proizvodnju električne i toplinske energije te one za prirodni plin iznose [20]:

$$\eta_{E,Ref} = 52,5\%$$

$$\eta_{H,Ref} = 90\%$$

Ušteda primarne energije izračunava se prema jednadžbi (5.1):

$$UPE = \left( 1 - \frac{1}{\frac{\eta_{H,CHP}}{\eta_{H,Ref}} + \frac{\eta_{E,CHP}}{\eta_{E,Ref}}} \right) \cdot 100\% = 31,03\%$$

Utrošena energija goriva za odvojenu proizvodnju određuje se prema:

$$F_{odvojeno} = \frac{E_{CHP}}{\eta_{E,Ref}} + \frac{H_{CHP}}{\eta_{H,Ref}} = \frac{190}{0,525} + \frac{200}{0,9} = 584,127 \text{ GWh}$$

pa ušteda primarne energije iznosi 181,25 GWh.

S obzirom da je izračunata ušteda veća od 10% zaključuje se da bi postojeće postrojenje moglo ostvariti status povlaštenog proizvođača, ali samo za određenu proizvedenu električnu energiju, tj. prema ovom proračunu 190 GWh, odnosno 12,09% od ukupno proizvedene električne energije.

## 6. OPTIMIRANJE I POBOLJŠANJE PROCESA

U prethodnim poglavljima je pokazano da postojeće kombinirano kogeneracijsko postrojenje ne zadovoljava uvjet ukupne godišnje učinkovitosti od 80%. Zbog toga može ostvariti status povlaštenog proizvođača samo za relativno mali udio proizvedene električne energije.

U poglavlju 5.2 izračunata je ukupna godišnja učinkovitost od 53,15%, što je u odnosu na potrebnu (od 80%) značajna razlika. Postrojenje bloka L u TE-TO Zagreb (električne snage 112 MW<sub>e</sub> i toplinske snage 110 MW<sub>t</sub>) isto je kombinirano kogeneracijsko te zadovoljava uvjet ukupne učinkovitosti i ima status povlaštenog proizvođača [22,23]. Iz navedenog je jasno da se ukupna učinkovitost bloka C TE-TO Sisak može povećati ili dodatnom proizvodnjom toplinske energije tj. povećanjem toplinske snage, ili smanjenjem električne snage, čime će se smanjiti i utrošena energija goriva. Kako je za značajno smanjenje električne snage potrebno znatno modificirati postrojenje (zamjena električnog generatora plinske turbine), a i smanjila bi se proizvodnja električne energije te ujedno i prihodi, ta se analiza neće razmatrati. Analizirat će se:

- promjena parametara oduzimanja pare na kondenzacijskoj parnoj turbini;
- povećanje toplinske snage, s minimalnom modifikacijom postojećeg postrojenja.

### 6.1. *Promjena parametara oduzimanja pare na kondenzacijskoj parnoj turbini*

Postojeće postrojenje ima jedno oduzimanje pare tlaka 16 bar i temperature 300 °C. U poglavlju 4.4. opisana je regulacija temperature oduzimanja. Oduzimanjem 65,664 t/h pare navedenih parametara, što odgovara toplinskoj snazi od 50 MW<sub>t</sub>, postiže se ukupni stupanj iskoristivosti od 57,01% u zimskom razdoblju. Prikazat će se utjecaj promjene tlaka i temperature oduzimanja te utjecaj dodatnog oduzimanja pare.

#### 6.1.1. *Promjena tlaka oduzimanja*

Rezultati dobiveni variranjem tlaka oduzimanja pri toplinskoj snazi od 50 MW<sub>t</sub>, prikazani su u tablici 6.1. Iz tablice se vidi da smanjenjem tlaka oduzimanja pare dolazi do povećanja snage na generatoru parne turbine te zbog toga raste i ukupna iskoristivost.

Međutim, ukupna iskoristivost je pri tlaku oduzimanja od 6 bar samo 0,52% veća od one kod tlaka oduzimanja od 16 bar.

**Tablica 6.1: Utjecaj promjene tlaka oduzimanja na snagu na generatoru parne turbine i ukupnu iskoristivost**

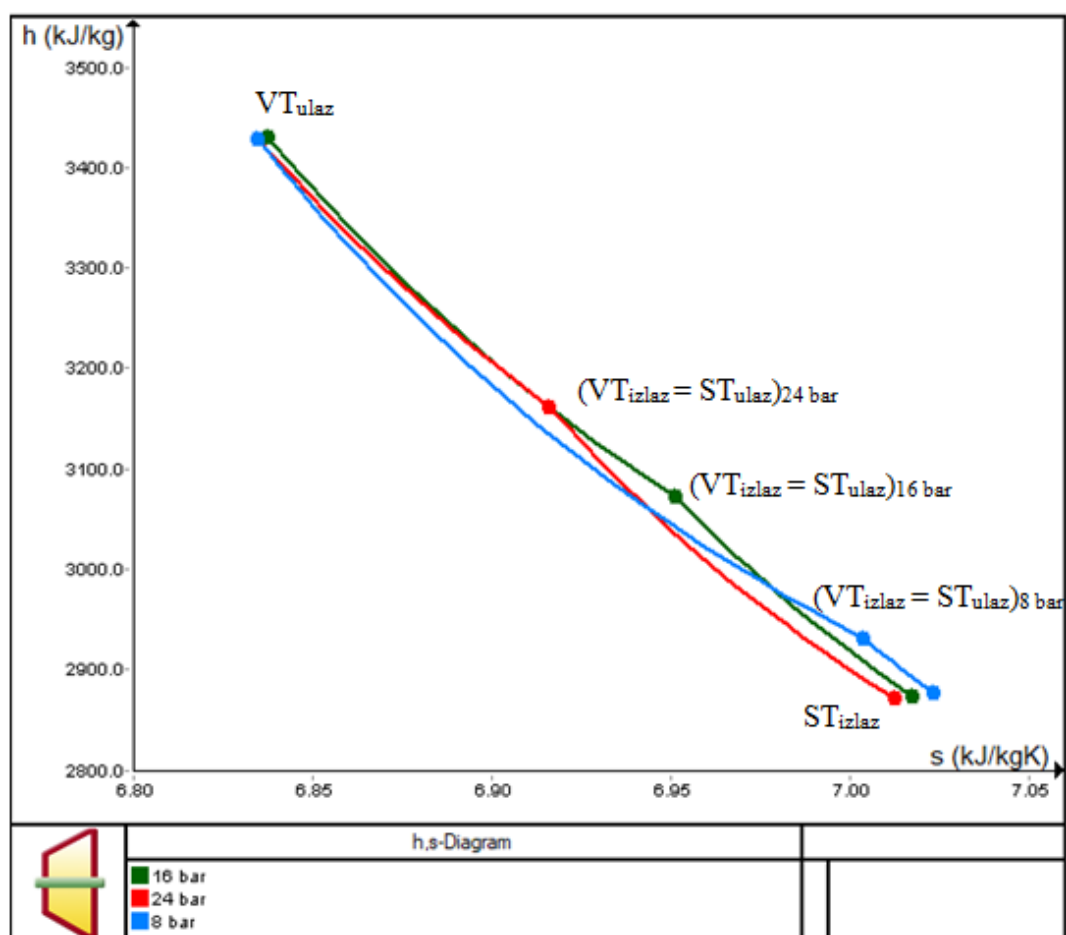
<b>Tlak oduzimanja [bar]</b>	<b>El. snaga parne turbine [MW]</b>	<b>Ukupna iskoristivost [%]</b>
6	67,646	57,53
8	66,962	57,39
12	65,98	57,19
16	65,061	57,01
20	64,143	56,82
24	63,505	56,60

Tablica 6.2 i slika 6.1 pokazuju zašto dolazi do povećanja snage na generatoru parne turbine smanjenjem tlaka oduzimanja. Mehanička snaga VT turbinskog stupnja se smanjenjem tlaka oduzimanja povećava jer se specifična entalpija na izlazu iz VT stupnja, na srednjem tlaku (tj. specifična entalpija oduzimanja) smanjuje, pa je veći entalpijski pad u VT turbinskom stupnju (maseni protok konstantan; specifična entalpija na ulazu u VT stupanj konstantna, označeno s  $VT_{ulaz}$  na slici 6.1). Mehanička se snaga kroz ST stupanj smanjuje (manja spec. entalpija na ulazu, koja je jednaka spec. entalpiji na izlazu iz VT stupnja; nešto veća spec. entalpija na izlazu; maseni protok približno konstantan), ali se snaga VT stupnja više povećava od tog smanjenja te se ukupna mehanička snaga parne turbine povećava (snaga kroz NT stupanj je približno konstantna, što prikazuje slika 6.2). Pri tlaku oduzimanja od 6 bar snaga VT stupnja je za 10,576 MW veća od one kod 16 bar, a snaga ST stupnja manja je za 7,279 MW te je ukupna snaga parne turbine veća pri nižem tlaku oduzimanja.

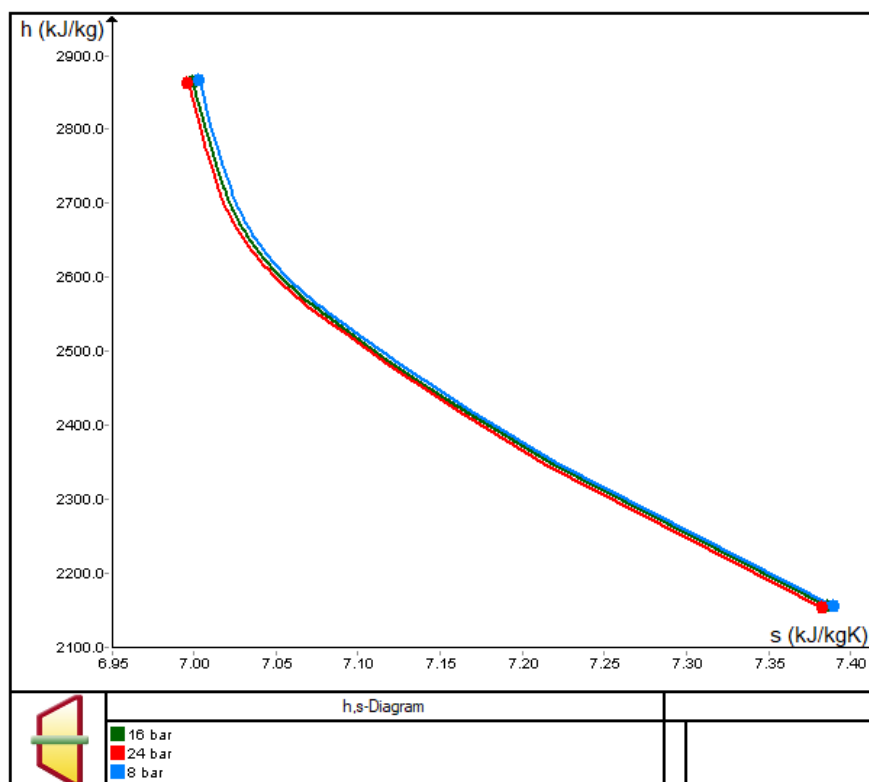
Minimalna vrijednost tlaka oduzimanja je 6 bar te je kod njega snaga ST stupnja jednaka nuli (zbog iste spec. entalpije na ulazu i izlazu iz stupanj), a daljnjim smanjivanjem tlaka program javlja grešku jer bi tlak na ulazu u ST stupanj bio manji od tlaka na izlazu (6 bar), te bi se tlak u turbini povećavao, što je fizikalno nemoguće.

Tablica 6.2: Utjecaj tlaka oduzimanja na mehaničku snagu VT i ST turbinskog stupnja

Tlak oduzimanja [bar]	Mehanička snaga VT stupnja [MW]	Mehanička snaga ST stupnja [MW]
6	30,175	0
8	27,274	1,965
12	22,906	4,989
16	19,599	7,279
20	16,909	9,103
24	14,652	10,666

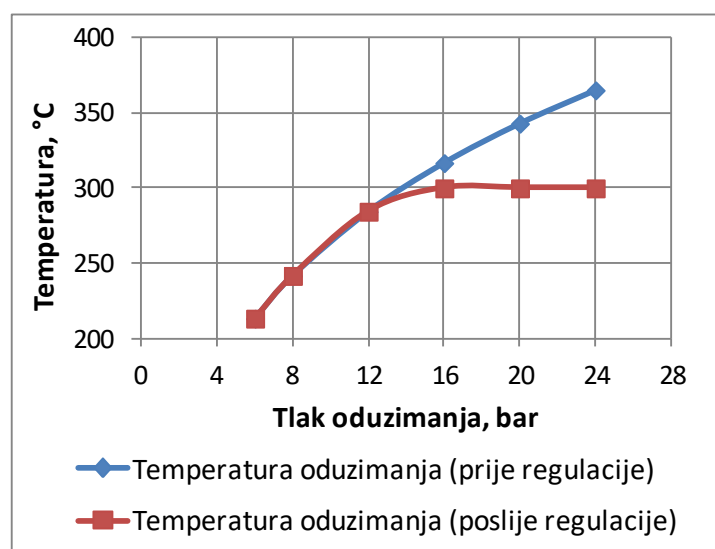


Slika 6.1: Utjecaj promjene tlaka oduzimanja na VT i ST turbinski stupanj



Slika 6.2: Utjecaj promjene tlaka oduzimanja na NT turbinski stupanj

Zanimljiv je utjecaj promjene tlaka oduzimanja na temperaturu oduzimanja (slika 6.3). Može se uočiti da se temperatura oduzimanja prije regulacije smanjuje smanjenjem tlaka oduzimanja. Međutim, regulacija temperature oduzimanja na traženu vrijednost od 300 °C ne radi pri tlakovima oduzimanja manjim od 16 bar, jer je temperatura prije regulacije niža od 300 °C te bi se ubrizgavanjem vode temperatura još više smanjila.

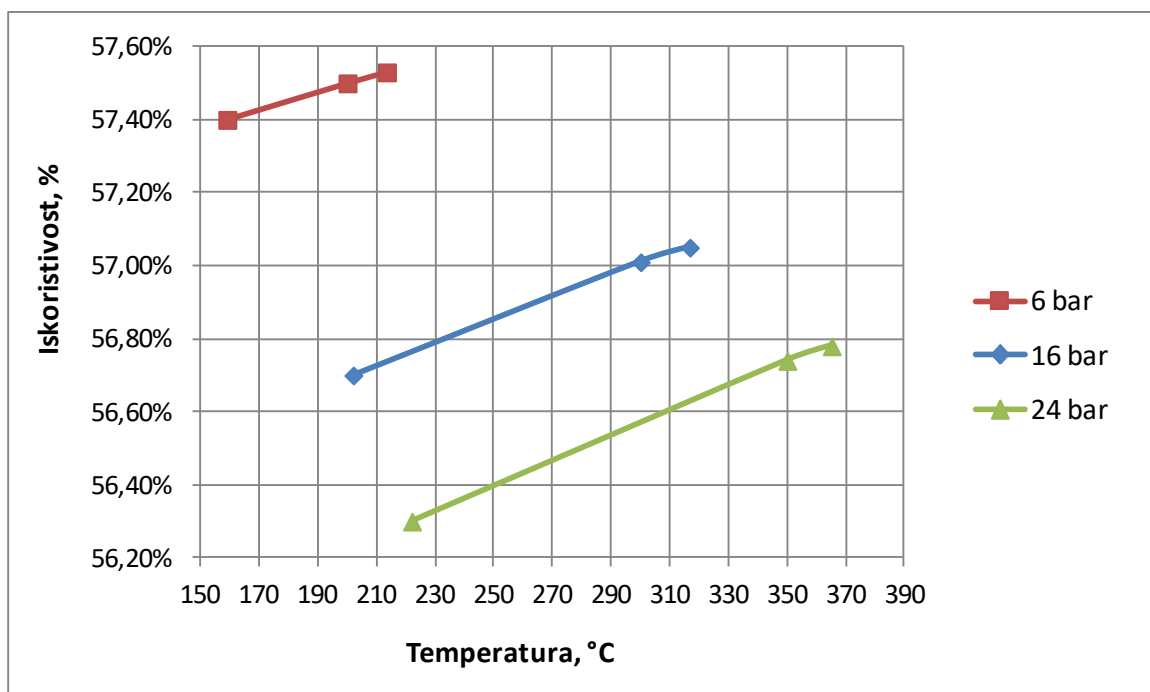


Slika 6.3: Utjecaj promjene tlaka oduzimanja na temperaturu oduzimanja

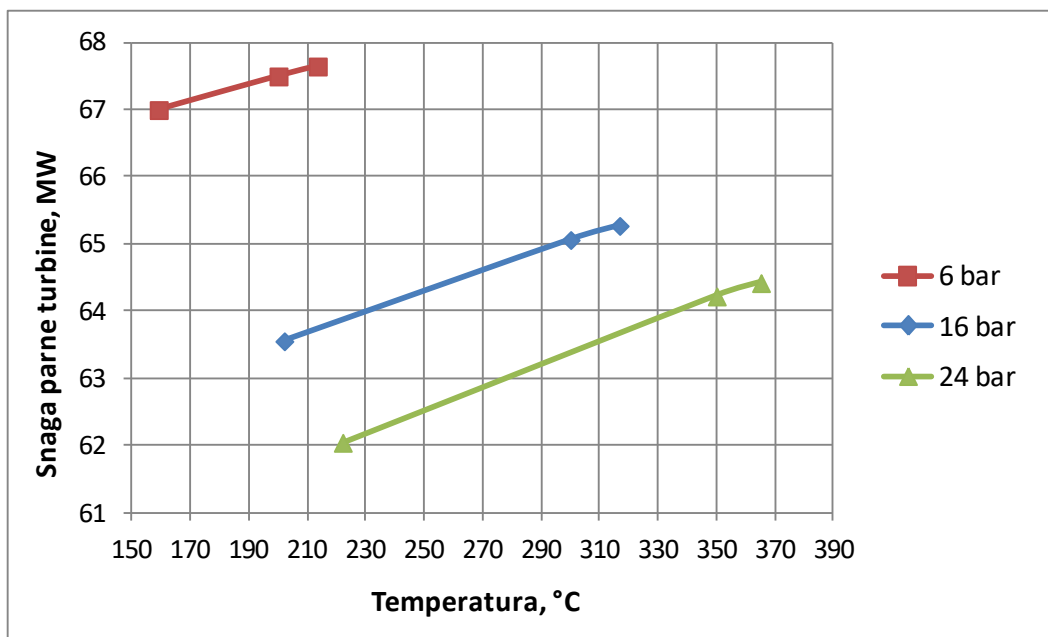
### 6.1.2. Zajednički utjecaj promjene temperature i tlaka oduzimanja

Za tlak oduzimanja od 16 bar, maksimalna vrijednost temperature oduzimanja iznosi 316,768 °C te je za povećanje temperature nužno povećati i tlak oduzimanja (slika 6.3). Za smanjenje temperature oduzimanja nije potrebno smanjiti tlak, jer će se temperatura smanjiti regulacijom tj. ubrizgavanjem vode. Utjecaj temperature i tlaka oduzimanja na ukupni stupanj iskoristivosti prikazuje slika 6.4. Vidi se da je kod najmanjeg tlaka oduzimanja ukupna iskoristivost najveća (opisano u poglavlju 6.1.1.). Utjecaj temperature oduzimanja prikazan je za tri različita tlaka te se smanjenjem temperature ukupna iskoristivost smanjuje, jer se smanjuje i snaga parne turbine (slika 6.5), zbog većeg protoka oduzimanja pa je manji protok kroz turbinu (slika 6.6). Protok oduzimanja raste jer je toplinska snaga održavana na konstantnoj vrijednosti od 50 MWt, pa je pri nižim temperaturama potrebno oduzimati više pare, da bi toplinska snaga ostala ista.

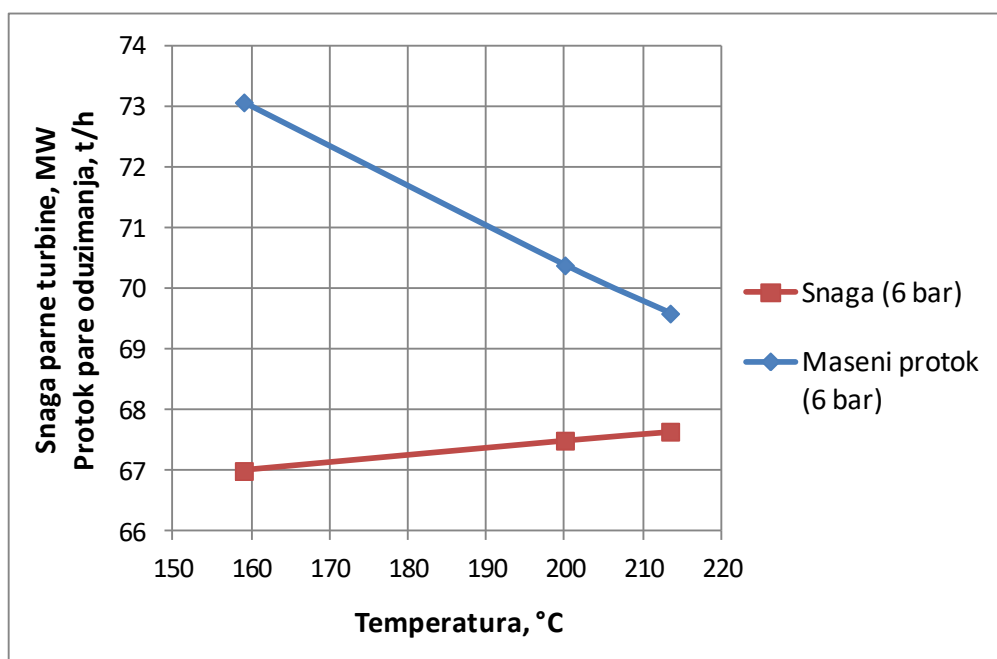
Prikazana temperaturna područja prikazuju ograničenja minimalnih, odnosno maksimalnih temperatura. Na primjer, pri tlaku od 6 bar minimalna temperatura iznosi 159 °C, a maksimalna 213,436 °C. Ako se unese vrijednost temperature oduzimanja manja od minimalne program javlja grešku jer je maseni protok oduzimanja veći od protoka na ulazu u parnu turbinu.



Slika 6.4: Utjecaj promjene temperature i tlaka oduzimanja na ukupni stupanj iskoristivosti



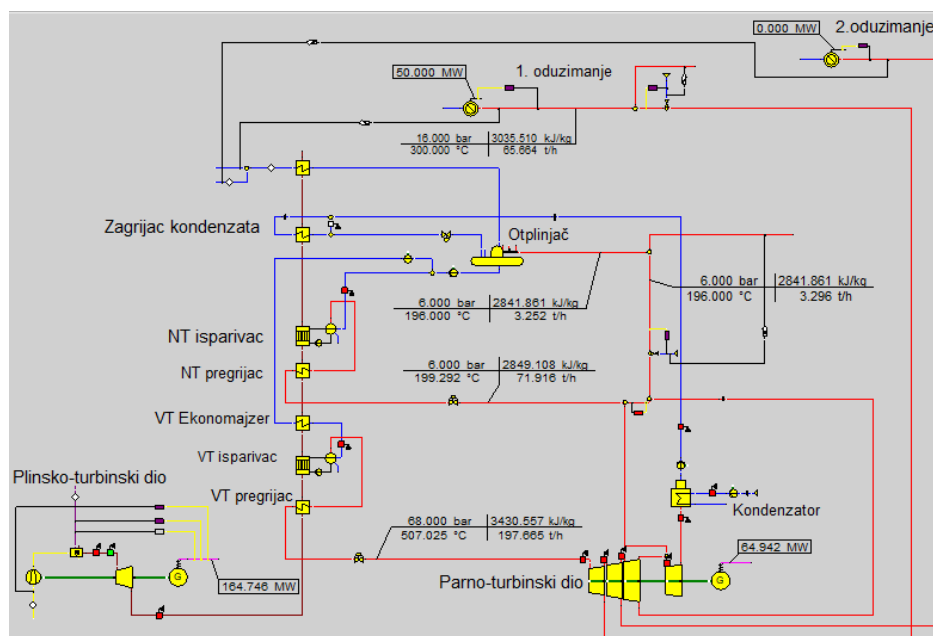
Slika 6.5: Utjecaj promjene temperature i tlaka oduzimanja na snagu parne turbine



Slika 6.6: Utjecaj promjene temperature i tlaka oduzimanja na snagu parne turbine i maseni protok oduzimanja

### 6.1.3. Utjecaj dodatnog oduzimanja pare

U poglavljima 6.1.2. i 6.1.1. pokazano je da se najveći ukupni stupanj iskoristivosti postiže kod tlaka od 6 bar. Stoga će se analizirati rad postrojenja s dva oduzimanja pare (slika 6.7), jedno pri tlaku od 16 bar i temperaturi 300 °C, a drugo pri tlaku od 6 bar i temperaturi 213 °C.



Slika 6.7: Shema postrojenja s dva oduzimanja pare

Rezultati za postrojenje s dva oduzimanja dani su u tablici 6.3. Analiza je provedena na način da se ukupna toplinska snaga ne mijenja te iznosi 50 MW<sub>t</sub>, dok se toplinska snaga pri tlaku oduzimanja od 16 bar smanjuje za 20 MW<sub>t</sub>, a toplinska snaga pri tlaku oduzimanja od 6 bar povećava se za taj iznos. Smanjenjem toplinske snage pri tlaku od 16 bar i povećanjem one kod 6 bar, ukupna iskoristivost se povećava zbog prije opisanih razloga (poglavlje 6.1.1.).

Tablica 6.3: Utjecaj dodatnog oduzimanja na ukupnu iskoristivost i snagu parne turbine

Toplinska snaga (16 bar) [MW]	Toplinska snaga (6 bar) [MW]	Ukupna iskoristivost [%]	Snaga parne turbine [MW]
50	0	56,98	64,942
30	20	57,20	66,032
20	30	57,31	66,577
0	50	57,54	67,666



## 6.2. Povećanje toplinske snage

Toplinska snaga postojećeg postrojenja iznosi 50 MW<sub>t</sub>, dok je instalirana električna snaga 230 MW<sub>e</sub>. Za postojeće postrojenje izračunata je vrijednost ukupne godišnje učinkovitosti od 53,15% (poglavlje 5.2.) te je za ispunjenje kriterija visoke učinkovitosti (ukupna učinkovitost od 80%) potrebno značajno povećati toplinsku snagu. Ako se prema proračunu provedenom u poglavlju 5.2. za ukupnu godišnju učinkovitost odabere vrijednost od 80% (uz istu utrošenu energiju goriva i proizvedenu električnu energiju) slijedi da bi za postizanje kriterija visoke učinkovitosti godišnja proizvedena toplinska energija trebala iznositi:

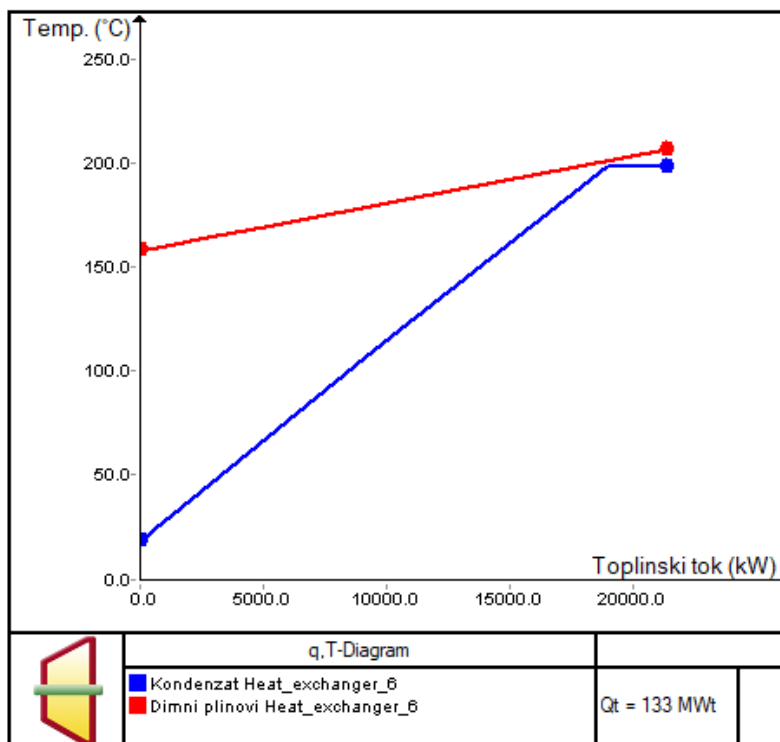
$$H_{CHP} = \eta_{uk} \cdot Q_g - E_{el} = 0,8 \cdot 3334,3 - 1572,15 = 1095,29 \text{ GWh}$$

Uz pretpostavljeni broj sati rada u kogeneracijskom režimu, slijedi potrebna toplinska snaga:

$$Q_T = \frac{H_{CHP} \cdot 1000}{4000} = \frac{1095290}{4000} = 273,823 \text{ MW}_t$$

što je povećanje od 223,823 MW<sub>t</sub> u odnosu na trenutnu toplinsku snagu.

Međutim, postoje određena ograničenja tog povećanja. Maksimalna toplinska snaga procesne pare oduzimanja, koja se može postići bez promjena postojećeg postrojenja, iznosi 132 MW<sub>t</sub> u zimskom razdoblju pri 100% opterećenja. Daljnjim povećanjem toplinske snage procesne pare, program javlja da je došlo do isparavanja kondenzata u zagrijaču kondenzata (ekonomajzeru), što je registrirano kao greška. Do isparavanja dolazi jer se protok kondenzata iz kondenzatora smanjuje povećanjem toplinske snage (kod 132 MW<sub>t</sub> iznosi 25,117 kg/s te je manji za 30,623 kg/s u odnosu na onaj kod 50 MW<sub>t</sub>), pa za isti izmjenjeni toplinski tok na zagrijaču prema jednadžbi za izmjenjeni toplinski tok (3.38) slijedi da se entalpija kondenzata na izlazu mora povećavati te se ujedno povećava i temperatura, te zbog toga dolazi do isparavanja, odnosno na izlazu iz zagrijača je mokra para, a ne kapljevina. Na slici 6.8 je prikazan izmjenjeni toplinski tok kod toplinske snage od 133 MW<sub>t</sub> te se vidi da dolazi do isparavanja kod temperature od 198,295°C. Ta se greška može ispraviti smanjenjem površine za izmjenu topline zagrijača kondenzata. S obzirom da je za to potrebno modificirati ili zamijeniti zagrijač, što će utjecati na cjelokupni proces, neće se uzeti u obzir.

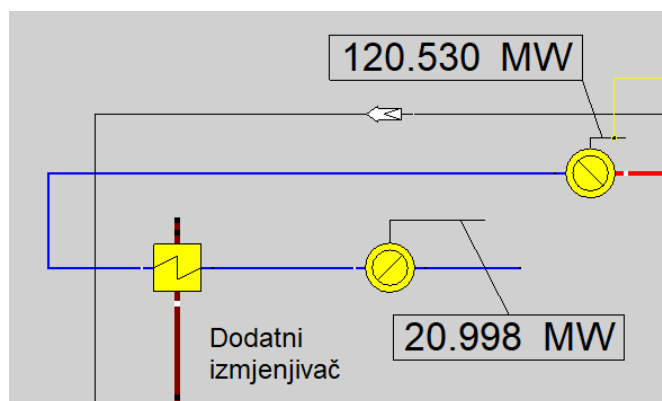


**Slika 6.8: Izmjenjeni toplinski tok na zagrijaču kondenzata kod toplinske snage od 133 MW<sub>t</sub>**

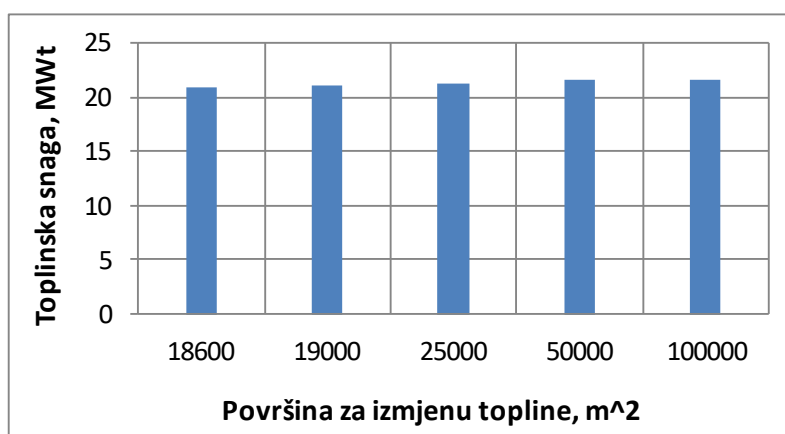
Pri smanjenom opterećenju od 70% i uz toplinsku snagu od 132 MW<sub>t</sub>, program javlja nekoliko grešaka. Osim isparavanja u zagrijaču kondenzata, dolazi do poremećaja masene bilance u parnoturbinskim stupnjevima. Pri smanjenom opterećenju, manji je maseni protok dimnih plinova te je i manji izmjenjeni toplinski tok u kotlu na ispušne plinove, što dovodi do smanjenja masenog protoka proizvedene pare. Maseni protok proizvedene VT pare pri 70% opterećenja iznosi 49,889 kg/s, a maseni protok pare oduzimanja 51,816 kg/s (za toplinsku snagu od 132 MW<sub>t</sub>), što zapravo znači da je oduzimanje pare veće od proizvodnje te je protok kroz ST turbinski stupanj negativan što je fizikalno nemoguće. Zbog navedenog je potrebno smanjiti toplinsku snagu na 120,53 MW<sub>t</sub>, što je maksimalna toplinska snaga pare oduzimanja kod koje program ne javlja grešku na smanjenom opterećenju. Za daljnje razmatranje odabire se toplinska snaga procesne pare od 120,53 MW<sub>t</sub> te se pri tome oduzima 158,291 t/h pare.

Ukupna toplinska snaga može se povećati i iskorištavanjem otpadne topline dimnih plinova. Za to je potrebno ugraditi dodatni izmjenjivač topline na izlazu kotla na ispušne plinove, koji će utjecati samo na toplinsko stanje dimnih plinova na izlazu. U tom izmjenjivaču bi se iskoristila preostala otpadna topline dimnih plinova za zagrijavanje povratnog kondenzata iz CTS-a te bi se tako zagrijani kondenzat ponovno slao u CTS (slika 6.9). U tom slučaju potrebne su određene preinake i dodatna oprema (cjevovod, armatura, mjerilo predane tj.

preuzete toplinske energije, itd.) na CTS-u. Dodatna toplinska snaga koja se može postići ugradnjom dodatnog izmjenjivača iznosi  $21 \text{ MW}_t$ , uz odabranu površinu za izmjenu topline dodatnog izmjenjivača od  $18600 \text{ m}^2$ . Daljnje povećanje površine nema značajan utjecaj na povećanje toplinske snage (slika 6.10) pa je radi ekonomičnosti odabrana navedena površina.



Slika 6.9: Povećanje toplinske snage ugradnjom dodatnog izmjenjivača na izlazu iz HRSG



Slika 6.10: Utjecaj površine dodatnog izmjenjivača na dodatnu toplinsku snagu

Zbroj dodatne toplinske snage od  $21 \text{ MW}_t$  i odabrane toplinske snage procesne pare od  $120,53 \text{ MW}_t$  daje ukupnu toplinsku snagu poboljšanog postrojenja od  $141,53 \text{ MW}_t$ , što je u odnosu na postojeće postrojenje povećanje toplinske snage od  $91,53 \text{ MW}_t$ .

Postavlja se pitanje, je li navedeno povećanje toplinske snage realno, tj. može li se dodatna proizvedena toplinska energija iskoristiti na koristan način. Da bi se opravdalo navedeno povećanje toplinske snage, morala bi se provesti detaljna analiza toplinskog konzuma grada Siska te mogućnosti za njegovo proširenje (potencijalni dodatni potrošači), za što su potrebni potpuni podaci o toplinskom konzumu grada Siska. S obzirom da takvi podaci nisu dostupni, navest će se zašto bi povećanje toplinske snage bilo opravdano:

1. Stari blokovi A i B u TE Sisak (pušteni u pogon 1970-ih) danas imaju ulogu rotirajuće ili hladne rezerve u elektroenergetskom sustavu Republike Hrvatske te 2010. godine nisu radili, a 2011. je blok A radio 881 sat, dok je blok B radio samo 135 sati [24]. S obzirom da je proizvodnja električne energije iz ovih blokova napuštena [25] zaključuje se da će oni uskoro izaći iz pogona te će njihovu proizvodnju u potpunosti preuzeti blok C.
2. Projekcija ukupne potrebne korisne toplinske energije u 2015. godini za kućanstva, industriju i uslužni sektor u gradu Sisku iznosila je 258 GWh [25], a u poglavlju 5.2. izračunata je proizvedena toplinska energija iz bloka C u iznosu 200 GWh. Iz navedenog se zaključuje da postoji potreba za određenim povećanjem toplinske snage.
3. U gradu Sisku se distribucijskom mrežom toplinskog sustava (kojim upravlja HEP Toplinarstvo), ukupne duljine 26600 m, opskrbljuje 4139 krajnjih kupaca (4053 kućanstva i 86 industrijski subjekti) [25]. Ukupni broj kućanstava u gradu Sisku 2011. godine iznosio je 18203 [26], te se zaključuje da bi se dio novih kućanstava mogao spojiti na distribucijsku toplinsku mrežu, ako bi im to bilo isplativije.
4. Prema analizi potencijalnih novih lokacija za visokoučinkovitu kogeneraciju u 2030. godini, izračunati dodatni potrebni teorijski toplinski kapacitet u gradu Sisku iznosi 118 MW<sub>t</sub> [25]. Uzimajući u obzir izračunato povećanje toplinske snage poboljšanog postrojenja od 91,53 MW<sub>t</sub>, može se zaključiti da je to povećanje opravdano.
5. Zbog podizanja životnog standarda i ekoloških razloga, u gradu Sisku predviđena je gradnja središnjeg daljinskog grijanja sa izgradnjom vrelovoda i toplinskih podstanica. Na vrelovodnu mrežu planira se priključenje: gospodarskih, javnih i društvenih sadržaja, poslovnih prostora, te višestambenih stambenih zgrada i stambenih nizova [25].

### 6.2.1. Rezultati za povećanje toplinske snage

Usporedba rezultata za zimsko razdoblje i 100% opterećenja, pri toplinskoj snazi od 50 MW<sub>t</sub> i pri povećanoj toplinskoj snazi od 141,53 MW<sub>t</sub> prikazana je u tablici 6.4. Iz tablice se vidi da su maseni protok goriva ( $q_{m,g}$ ) i snaga na generatoru plinske turbine ( $P_{el,PT}$ ) jednaki u oba slučaja te je jasno da ugrađeni dodatni izmjenjivač nema utjecaja na plinsko-turbinski dio postrojenja. Međutim, značajan je utjecaj na parno-turbinski dio. Snaga na generatoru parne turbine je kod povećane toplinske snage manja za 23,475 MW<sub>e</sub>, to je ujedno i smanjenje ukupne električne snage. Zbog manje ukupne električne snage, ukupna električna iskoristivost je kod povećane toplinske snage manja za 4,78%, ali je kod povećane toplinske snaga ukupni stupanj iskoristivosti veći za 13,86% te iznosi 70,87%, što je znatno povećanje. Za navedenu konfiguraciju postrojenja nije bilo moguće postići ukupni stupanj iskoristivosti od 80% zbog ograničenja opisanih u prethodnom poglavlju.

**Tablica 6.4: Usporedba rezultata kod povećanja toplinske snage**

	$Q_T = 50 \text{ MW}_t$	$Q_T = 141,53 \text{ MW}_t$
$q_{m,g} [\text{kg/s}]$	9,91	9,91
$P_{el,PT} [\text{MW}_e]$	164,746	164,746
$\eta_{el,PT} [\%]$	33,56	33,56
$P_{el,PAT} [\text{MW}_e]$	65,061	41,586
$P_{el,uk} [\text{MW}_e]$	229,807	206,332
$\eta_{el,uk} [\%]$	46,82	42,04
$\eta_{uk} [\%]$	57,01	70,87

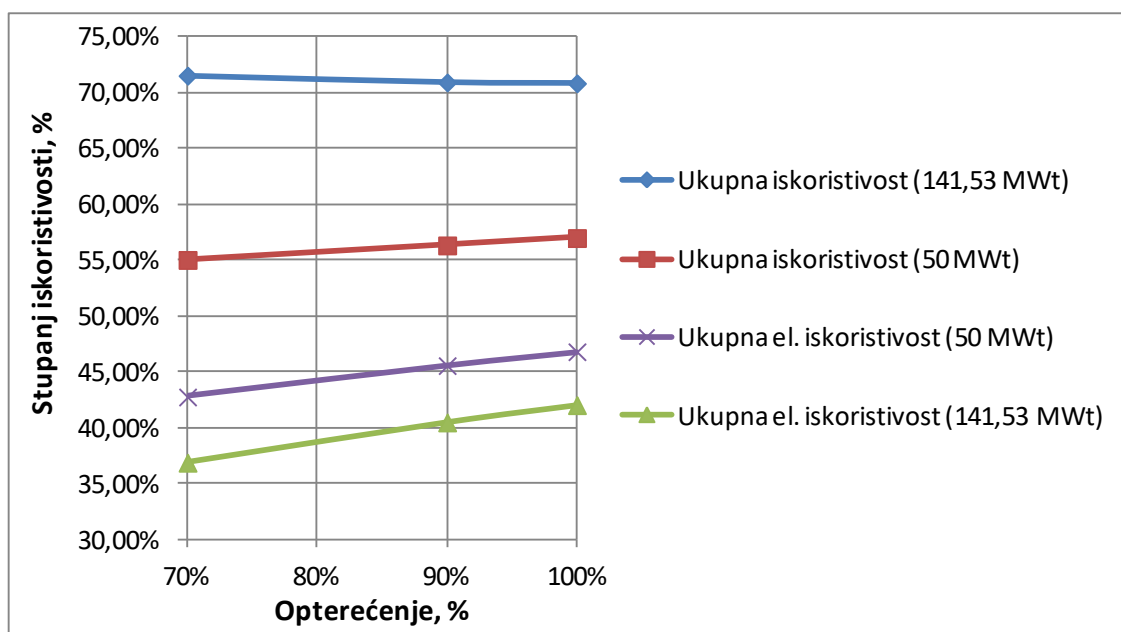
Rezultati za različita opterećenja, dobiveni povećanjem toplinske snage na 141,53 MW<sub>t</sub>, prikazani su u tablici 6.5. Može se vidjeti da se smanjenjem opterećenja ukupna električna iskoristivost ( $\eta_{el,uk}$ ) smanjuje zbog toga jer je smanjenje ukupne električne energije ( $P_{el,uk}$ ) veće od smanjenja uložene toplinske snage goriva ( $P_g$ ). Ukupni stupanj iskoristivosti ( $\eta_{uk}$ ) je veći kod manjeg opterećenja, jer je smanjenje zbroja ukupne električne i toplinske snage ( $P_{el,uk} + Q_T$ ) manje od smanjenja uložene toplinske snage goriva, a određuje se prema jednadžbi:

$$\eta_{uk} = \frac{P_{el,uk} + Q_T}{P_g}$$

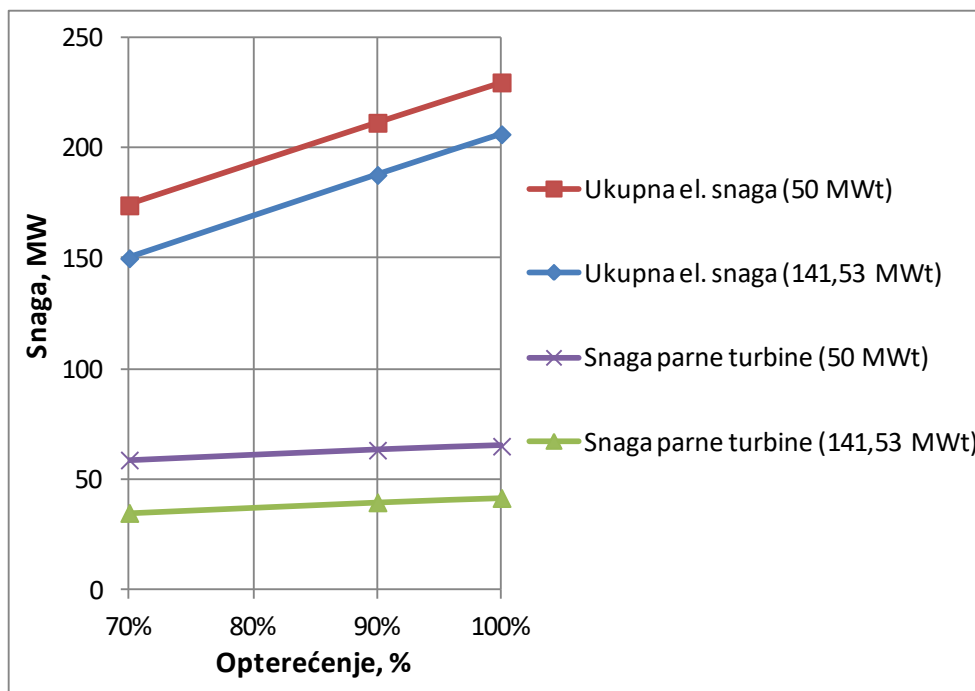
Tablica 6.5: Rezultati za različita opterećenja kod povećane toplinske snage

Opterećenje [%]	$P_{el,uk}$ [MW <sub>e</sub> ]	$Q_T$ [MW <sub>t</sub> ]	$P_{el,uk} + Q_T$ [MW]	$P_g$ [MW <sub>t</sub> ]	$\eta_{el,uk}$ [%]	$\eta_{uk}$ [%]
100	206,332	141,53	347,862	490,846	42,04	70,87
90	187,9	141,53	329,43	464,115	40,49	70,95
70	150,154	141,53	291,684	407,109	36,88	71,56
Postotno smanjenje [%] /						
razlika za $\eta$ [%]	27,23	0	16,15	17,06	5,16	-0,69
(od 100% do 70%)						

Slika 6.11 prikazuje promjene stupnjeva iskoristivosti promjenom opterećenja za toplinske snage od 50 MW<sub>t</sub> i 141,53 MW<sub>t</sub>. Može se uočiti da se ukupna iskoristivost kod toplinske snage od 50 MW<sub>t</sub> smanjuje padom opterećenja, a kod 141,53 MW<sub>t</sub> povećava zbog prije navedenog razloga. Ukupna se iskoristivost kod 50 MW<sub>t</sub> smanjuje jer je u ovom slučaju, smanjenje zbroja ukupne električne i toplinske snage (smanjenje od 19,9%) veće od smanjenja uložene toplinske snage goriva, koja se smanjuje za isti postotak kao i kod toplinske snage od 141,53 MW<sub>t</sub>. Ukupna električna iskoristivost smanjuje se padom opterećenja u oba slučaja, ali se više smanjuje kod veće toplinske snage jer je u tom slučaju manja snaga parne turbine pa je manja i ukupna električna snaga (slika 6.12).



Slika 6.11: Ovisnost stupnjeva iskoristivosti o opterećenju kod različitih toplinskih snaga



Slika 6.12: Promjena električnih snaga u ovisnosti o opterećenju kod različitih toplinskih snaga

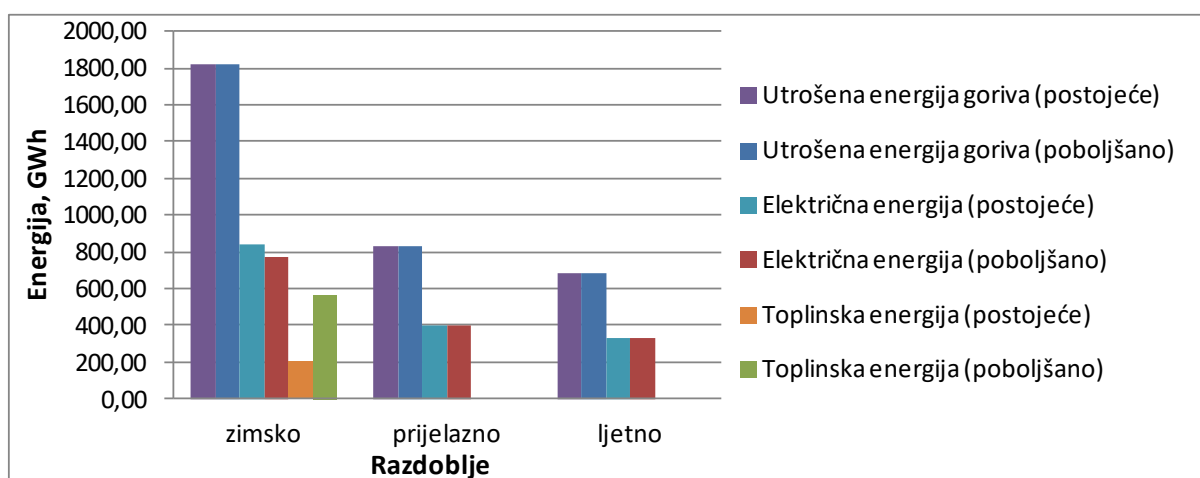
### 6.2.3. Izračun uštede primarne energije za poboljšano postrojenje

Ušteda primarne energije odredit će se i za postrojenje sa povećanom toplinskom snagom od 141,53 MW<sub>t</sub>. Postupak je jednak onom opisanom u poglavlju (5.2) gdje je određena UPE za postojeće postrojenje tj. za toplinsku snagu od 50 MW<sub>t</sub>. Za poboljšano postrojenje pretpostavljen je isti godišnji program rada (tablica 5.2) kao i za postojeće, kako bi se rezultati mogli što točnije usporediti. Za ljetno i prijelazno razdoblje korišteni su isti rezultati kao i za postojeće postrojenje (poglavljje 4.1.), dok su rezultati za zimsko razdoblje promijenjeni zbog povećanja toplinske snage.

U tablici 6.6 prikazani su rezultati proračuna utrošene energije goriva, proizvedene električne i toplinske energije za poboljšano postrojenje po razdobljima. Usporedba proizvedene i utrošene energije u postojećem i poboljšanom postrojenju prikazana je na slici 6.13. Može se uočiti da je utrošena energija goriva u poboljšanom postrojenju jednaka onoj u postojećem za sva tri razdoblja. Proizvedena električna energija u ljetnom i prijelaznom razdoblju ista je kao i kod postojećeg postrojenja, dok u zimskom razdoblju poboljšano postrojenje proizvodi 366,12 GWh više toplinske energije i 70,54 GWh manje električne energije u odnosu na postojeće postrojenje.

Tablica 6.6: Utrošena i proizvedena energija u poboljšanom postrojenju

Razdoblje	Sati rada [h/god]	Utrošena energija goriva, [GWh]	Električna energija, [GWh]	Toplinska energija, [GWh]
Zimsko	4000	1823,82	770,12	566,12
Prijelazno	1900	828,64	402,66	0
Ljetno	1600	681,84	328,83	0
UKUPNO	7500	3334,30	1501,60	566,12



Slika 6.13: Usporedba utrošene i proizvedene energije u postojećem i poboljšanom postrojenju

Ukupna godišnja učinkovitost poboljšanog postrojenja iznosi:

$$\eta_{uk} = \frac{E_{uk}}{Q_g} = \frac{E_{el} + H_{CHP}}{Q_g} = \frac{1501,60 + 566,12}{3334,30} = 0,6201 = 62,01\%$$

te je 8,86% veća u odnosu na onu kod postojećeg postrojenja (53,15%).

Izračunat će se i godišnja električna i toplinska iskoristivost:

$$\eta_{el} = \frac{E_{el}}{Q_g} = \frac{1501,60}{3334,30} = 0,4504 = 45,04\%$$

$$\eta_t = \frac{H_{CHP}}{Q_g} = \frac{566,12}{3334,30} = 0,1698 = 16,98\%$$

Godišnja električna iskoristivost poboljšanog postrojenja manja je za 2,11%, a godišnja toplinska iskoristivost veća je za 10,98% u odnosu na vrijednosti za postojeće postrojenje.

Ukupna iskoristivost poboljšanog postrojenja za zimsko razdoblje iznosi 73,27% (veća za 16,21% u odnosu na ukupnu iskoristivost postojećeg postrojenja zimi), a toplinska 31,04% (za 20,07% veća od one kod postojećeg).



S obzirom da je i kod poboljšanog postrojenja ukupna godišnja učinkovitost manja od propisane, ne može se sva električna energija priznati kao kogeneracijska pa se daljnji izračun mora provesti prema zadanom omjeru električne i toplinske energije jer stvarni omjer nije poznat. Taj omjer za kombinirani proces plinske i parne turbine iznosi  $C = 0,95$  (tablica 5.1) pa iz jednadžbe (5.3) slijedi kogeneracijska električna energija:

$$E_{CHP} = C_{zadano} \cdot H_{CHP} = 0,95 \cdot 566,12 = 537,814 \text{ GWh}$$

Nekogeneracijska električna energija, tj. električna energija koja ne ulazi u sustav poticaja određuje se prema (5.4):

$$E_{Non-CHP} = E_{el} - E_{CHP} = 1501,60 - 537,814 = 963,786 \text{ GWh}$$

Iz navedenog slijedi da će se poticati 35,82% od ukupno proizvedene električne energije u poboljšanom procesu. To je u odnosu na postojeće postrojenje povećanje od 23,73%.

Energija utrošenog goriva u nekogeneracijskoj proizvodnji iznosi:

$$F_{Non-CHP} = \frac{E_{Non-CHP}}{\eta_{el}} = \frac{963,786}{0,4504} = 2139,845 \text{ GWh}$$

Energija utrošenog goriva u kogeneracijskoj proizvodnji određuje se prema:

$$F_{CHP} = F - F_{Non-CHP} = 3334,30 - 2139,845 = 1194,455 \text{ GWh}$$

Nadalje se mogu odrediti električna i toplinska učinkovitost iz kogeneracijske proizvodnje:

$$\eta_{E,CHP} = \frac{E_{CHP}}{F_{CHP}} = \frac{537,814}{1194,455} = 0,4503 = 45,03\%$$

$$\eta_{H,CHP} = \frac{H_{CHP}}{F_{CHP}} = \frac{566,12}{1194,455} = 0,474 = 47,4\%$$

Za određivanje uštede primarne energije potrebno je poznavati i referentne učinkovitosti za odvojenu proizvodnju električne i toplinske energije te one za prirodni plin iznose [21]:

$$\eta_{E,Ref} = 52,5\%$$

$$\eta_{H,Ref} = 90\%$$

Ušteda primarne energije određuje se prema jednadžbi (5.1) te za poboljšano postrojenje iznosi:

$$UPE = \left( 1 - \frac{1}{\frac{\eta_{H,CHP}}{\eta_{H,Ref}} + \frac{\eta_{E,CHP}}{\eta_{E,Ref}}} \right) \cdot 100\% = 27,77\%$$

Kako je  $UPE > 10\%$  poboljšano postrojenje može ostvariti status povlaštenog proizvođača.

Ušteda primarne energije za poboljšano postrojenje manja je za 3,26% u odnosu na onu izračunatu za postojeće postrojenje, ali kao što je spomenuto veći je udio električne energije koji će se poticati pa to smanjenje UPE nije značajno.

Utrošena energija goriva za odvojenu proizvodnju određuje se prema:

$$F_{odvojeno} = \frac{E_{CHP}}{\eta_{E,Ref}} + \frac{H_{CHP}}{\eta_{H,Ref}} = \frac{537,814}{0,525} + \frac{566,12}{0,9} = 1653,43 \text{ GWh}$$

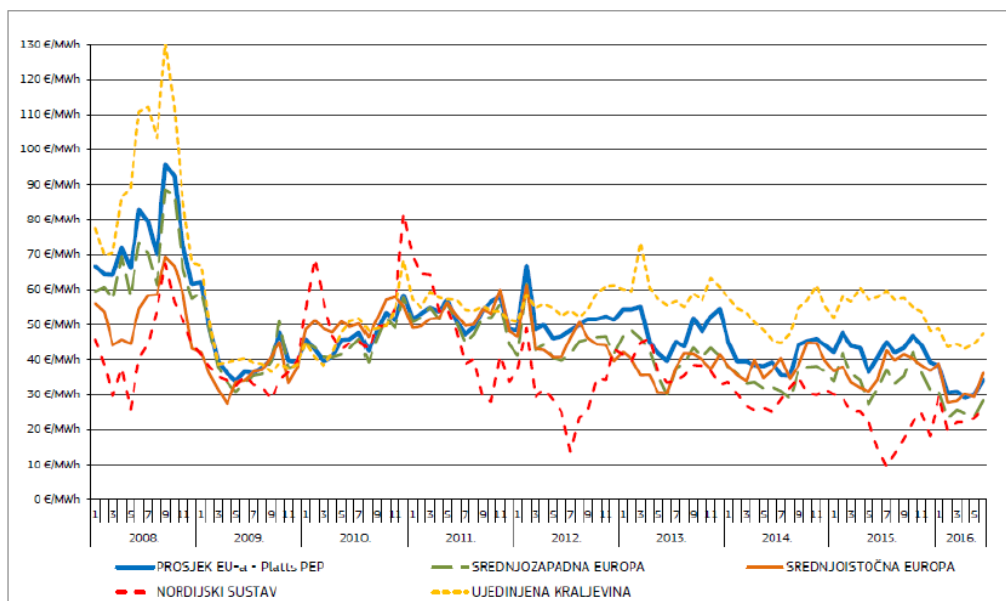
pa ušteda primarne energije iznosi 459,16 GWh te je ona za 277,91 GWh veća od ušede za postojeće postrojenje, pa se i iz navedenog zaključuje da manji postotak UPE za poboljšano postrojenje nije mjerodavan za usporedbu.

Nakon provedene analize uštede primarne energije za poboljšano postrojenje, može se zaključiti da se povećanjem toplinske snage sa 50 MW<sub>t</sub> na 141,53 MW<sub>t</sub> značajno povećala električna energija koja ulazi u sustav poticaja (povećanje od 347,814 GWh).

#### 6.2.4. Ekonomska analiza

U ovom poglavlju odredit će se ukupni godišnji trošak goriva i prihodi od prodane energije za postojeće i poboljšano postrojenje, kako bi se provjerila njihova ekonomska isplativost.

Poticajna cijena električne energije za kogeneracijska postrojenja jednaka je referentnoj cijeni električne energije (RC), a to je cijena jednaka iznosu važeće tarifne stavke za radnu energiju po jedinstvenoj dnevnoj tarifi, za opskrbu električnom energijom u okviru univerzalne usluge za tarifni model *Plavi*. Za sva proizvodna postrojenja za koja je definirana poticajna cijena u iznosu RC-a, a za svako obračunsko razdoblje isplate poticaja, isplaćivat će se trenutno važeći iznos RC [27]. Trenutno važeća poticajna cijena električne energije iznosi 0,52 kn/kWh [28], odnosno 69,93 €/MWh. S obzirom da se cijene električne energije na europskom tržištu neprestano mijenjaju (slika 6.14) [29], ekonomska analiza provest će se za cijene električne energije prikazane u tablici 6.7. Cijena električne energije na tržištu je cijena za električnu energiju koja ne ulazi u sustav poticaja.



Slika 6.14: Kretanje cijena električne energije na europskom tržištu

Tablica 6.7: Cijene električne energije

	1. slučaj	2. slučaj	3. slučaj
Poticajna cijena električne energije [€/MWh]	70	100	130
Cijena električne energije na tržištu (dnevna/noćna tarifa) [€/MWh]	40/40	75/50	100/60

Cijena plinskog goriva i toplinske energije dane su u tablici 6.8 [23]. Pretpostavljene su konstantne vrijednosti kako bi se analizirao utjecaj promjena cijena električne energije.

Tablica 6.8: Cijena goriva i toplinske energije

Cijena prirodnog plina [€/MWh]	41
Cijena toplinske energije [€/MWh]	41

Rezultati ukupnog godišnjeg troška goriva, ukupnog godišnjeg prihoda od proizvedene električne i toplinske energije te zarada (gubitak), za navedene cijene i prethodno izračunate godišnje energije, prikazani su u tablicama 6.9 (1. slučaj), 6.10 (2. slučaj) i 6.11 (3. slučaj). Može se uočiti da su ukupni prihodi u sva tri slučaja znatno veći kod poboljšanog postrojenja jer se u njemu potiče sva proizvedena električna energija u zimskog razdoblju i dio u prijelaznom (ukupno 537,814 GWh), dok se u postojećem postrojenju potiče samo 190 GWh

električne energije, pa iako je proizvodnja električne energije veća u postojećem postrojenju, ukupni prihod od proizvedene električne energije veći je kod poboljšanog postrojenja. I ukupni prihod od proizvedene toplinske energije je veći kod poboljšanog postrojenja jer se u njemu proizvodi više toplinske energije. Ukupni trošak goriva se ne mijenja, jer je u utrošena energija goriva za postojeće i poboljšano postrojenje jednaka (poglavlje 6.2.3.).

Za 1. slučaj cijena električne energije i postojeće i poboljšano postrojenje ostvaraju gubitak na godišnjoj razini. Međutim, taj je gubitak kod postojećeg postrojenja veći za 31.894.460 €. Za 3. slučaj poboljšano postrojenje ostvaruje zaradu od 30.764.999,21 €, a postojeće gubitak od 11.433.914,13 €. Postojeće postrojenje nije ostvarilo zaradu ni u jednom slučaju pa se zaključuje da ono nije ekonomski isplativo. Poboljšano postrojenje ostvaruje značajan prihod za 3. slučaj, a u 2. slučaju je gubitak u odnosu na 1. slučaj minimalan te se zaključuje da je ono isplativo, ali kod nešto većih cijena električne energije.

Međutim, ako se uzme u obzir da se i cijena prirodnog plina na tržištu mijenja, za prosječnu cijenu prirodnog plina u EU 2015. godine za velike potrošače od 31 €/MWh [29] dobiveni su rezultati za poboljšano postrojenje dani u tablici 6.12. Može se vidjeti da se kod cijene prirodnog plina od 31 €/MWh značajna zarada ostvaruje za 2. slučaj te još veća za 3. slučaj, dok je za 1. slučaj gubitak znatno manji u usporedbi s onim kod cijene prirodnog plina od 41 €/MWh. Rezultati za postojeće postrojenje kod manje cijene prirodnog plina prikazani su u tablici 6.13 te se vidi da ono ima zaradu tek za 3. slučaj cijena električne energije, ali je ta zarada u odnosu na poboljšano postrojenje manja za 42.198.913,33 €.

**Tablica 6.9: Ukupni prihod, ukupni trošak i gubitak/zarada za 1. slučaj**

	<b>Ukupni prihod [€]</b>	<b>Ukupni trošak [€]</b>	<b>Gubitak/Zarada [€]</b>
Postojeće	67.515.043,67	136.706.289,29	-69.191.254,63
Poboljšano	99.409.503,67	136.706.289,29	-37.296.794,63

**Tablica 6.10: Ukupni prihod, ukupni trošak i gubitak/zarada za 2. slučaj**

	<b>Ukupni prihod [€]</b>	<b>Ukupni trošak [€]</b>	<b>Gubitak/Zarada [€]</b>
Postojeće	99.312.441,25	136.706.289,29	-37.393.857,04
Poboljšano	135.505.044,58	136.706.289,29	-1.201.253,71

Tablica 6.11: Ukupni prihod, ukupni trošak i gubitak/zarada za 3. slučaj

	<b>Ukupni prihod [€]</b>	<b>Ukupni trošak [€]</b>	<b>Gubitak/Zarada [€]</b>
Postojeće	125.272.384,17	136.706.289,29	-11.433.914,13
Poboljšano	167.471.297,50	136.706.289,29	30.764.999,21

Tablica 6.12: Ukupni prihod, ukupni trošak i gubitak/zarada poboljšanog postrojenja za cijenu plina od 31 €/MWh

	<b>Ukupni prihod [€]</b>	<b>Ukupni trošak [€]</b>	<b>Gubitak/Zarada [€]</b>
1. slučaj	99.409.503,67	103.363.298,71	-3.953.795,04
2. slučaj	135.505.044,58	103.363.298,71	32.141.745,88
3. slučaj	167.471.297,50	103.363.298,71	64.107.998,79

Tablica 6.13: Ukupni prihod, ukupni trošak i gubitak/zarada postojećeg postrojenja za cijenu plina od 31 €/MWh

	<b>Ukupni prihod [€]</b>	<b>Ukupni trošak [€]</b>	<b>Gubitak/Zarada [€]</b>
1. slučaj	67.515.043,67	103.363.298,71	-35.848.255,04
2. slučaj	99.312.441,25	103.363.298,71	-4.050.857,46
3. slučaj	125.272.384,17	103.363.298,71	21.909.085,46

## ZAKLJUČAK

Analizom rezultata dobivenih u poglavlju 4.3 kod promjene stanja okolišnog zraka zaključuje se da značajan utjecaj na rad postrojenja imaju promjena tlaka i temperature, dok je utjecaj promjene relativne vlažnosti zraka zanemariv. Naravno, te promjene najviše utječu na plinsko-turbinski dio (slika 4.15, slika 4.30) jer kompresor usisava zrak okolišnog stanja. Snaga i električna iskoristivost plinske turbine proporcionalne su tlaku okolišnog zraka tj. povećanjem tlaka dolazi do povećanja snage i električne iskoristivosti, ali su obrnuto proporcionalne temperaturi okolnog zraka te se povećanjem temperature smanjuju. Međutim, postoji i određeni utjecaj na parno-turbinski proces, posebno se to odnosi na proizvodnju pare u kotlu na ispušne plinove. Proizvodnja pare ovisna je o svojstvima dimnih plinova iz plinske turbine (slika 4.21), a s obzirom da je pri većoj temperaturi okolnog zraka veća i temperatura dimnih plinova na ulazu u kotao (slika 4.20), bit će veći i izmjenjeni toplinski tok u VT isparivaču (slika 4.22) te će proizvodnja pare (čija se svojstva ne mijenjaju promjenom temperature, jer para ovisi samo o tlaku u isparivaču i svojstvima vode koja isparava) zbog toga narasti (slika 4.23), a to ujedno znači i da će snaga parne turbine biti veća (slika 4.19).

Analizom kogeneracijskog režima rada zaključuje se da promjena toplinske snage nema utjecaj na plinsko-turbinski dio, već samo na parno-turbinski te što je veća toplinska snaga to će snaga parne turbine biti manja (slika 4.36) zbog manjeg protoka kroz parnoturbinske stupnjeve. Električna se iskoristivost smanjuje, a ukupna iskoristivost raste povećanjem toplinske snage (slika 4.38) pa se zaključuje da je opravdano smanjiti snagu parne turbine povećanjem toplinske snage.

Na temelju dobivenih rezultata proračuna emisija (poglavljje 4.5) zaključuje se da je kogeneracijski režim (zimsko razdoblje) ekološki prihvatljiviji od čistog kombiniranog procesa. Naime izračunate emisije  $\text{NO}_x$ , CO i  $\text{CO}_2$  po toni goriva i po MWh proizvedene energije manje su za zimsko razdoblje, jer je utrošeno više goriva i proizvedeno više energije.

Osnovi uvjet za visokočinkovitu kogeneraciju je ušteda primarne energije od najmanje 10%, a dodatno se postavlja i kriterij ukupne godišnje učinkovitosti. Nakon određivanja utrošene i proizvedene energije u postojećem postrojenju odredila se UPE (poglavljje 5.2), no s obzirom na malu ukupnu godišnju učinkovitost (53,15%) ne može se ostvariti poticaj za svu proizvedenu električnu energiju. Kako je izračunata UPE postojećeg postrojenja u iznosu od

31,03% veća od 10% postrojenje može dobiti poticaj, ali za 190 GWh električne energije, što je samo 12,09% od ukupno proizvedene električne energije u postojećem postrojenju.

Zbog ovako malog udjela provedeno je poboljšanje procesa u cilju povećanja ukupne učinkovitosti. Zaljučuje se da promjena parametara oduzimanja pare na kondenzacijskoj parno turbini ne daje dovoljno povećanje ukupne iskoristivosti. Povećanjem toplinske snage (poglavlje 6.2) na 141,53 MW<sub>t</sub> (maksimalna snaga, uz minimalnu modifikaciju postojećeg postrojenja) postiže se ukupni stupanj iskoristivosti od 70,87% u kogeneracijskom režimu rada za zimsko razdoblje te je on 13,86% veći od ukupnog stupnja iskoristivosti postojećeg postrojenja (toplinske snage 50 MW<sub>t</sub>) za isto razdoblje.

U poboljšanom postrojenju (toplinske snage 141,53 MW<sub>t</sub>) ostvaruje se veća godišnja proizvodnja toplinske energije u odnosu na postojeće, ali i nešto niža proizvodnja električne energije. Proizvodi se 366,12 GWh više toplinske energije i 70,54 GWh manje električne energije. Ukupna godišnja učinkovitost poboljšanog procesa iznosi 62,01% te je 8,86% veća u odnosu na onu kod postojećeg postrojenja (53,15%). Ušteda primarne energije poboljšanog postrojenja iznosi 27,77% te zadovoljava uvjet od minimalno 10% UPE, a električna energija koja može dobiti poticaj iznosi 537,814 GWh tj. 35,82% od ukupno proizvedene električne energije (povećanje od 23,73% u odnosu na postojeće postrojenje). Povećanjem toplinske snage sa 50 MW<sub>t</sub> na 141,53 MW<sub>t</sub> značajno se povećala električna energija koja ulazi u sustav poticaja (povećanje od 347,814 GWh).

Provedena ekonomska analiza pokazala je znatno veću isplativost poboljšanog u odnosu na postojeće postrojenje. Tako na primjer, za 2. slučaj cijena električne energije i cijenu prirodnog plina od 31 €/MWh, poboljšano postrojenje ostvaruje godišnju zaradu od 32.141.745,88 € (tablica 6.12), dok postojeće postrojenje ima gubitak od 4.050.857,46 € (tablica 6.13). Iz navedenog se zaključuje da je povećanje toplinske snage ekonomski opravdano, ali kod nešto većih cijena električne energije i manjih cijena plina tj. isplativost ovisi o cijenama na tržištu. Međutim, važno je napomenuti da je ovo samo okvirni izračun te bi za stvarni gubitak ili zaradu, trebalo poznavati stvarne podatke o proizvodnji i potrošnji energije.

## LITERATURA

- [1] EKONERG d.o.o, Tehničko-tehnološko rješenje postrojenja Kombi kogeneracijske elektrane Sisak 230 MWe/50 MWt – TE Sisak blok C, Zagreb, 2013.
- [2] Bogdan, Ž., Termoeenergetska postrojenja – podloge za predavanja, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2012.
- [3] GAS TURBINE UNIT GTE-160 for CCP-230 of CHP plant SISAK-3, Croatia, Technical offer for delivery
- [4] Pathirathna, K.A.B. : Gas turbine thermodynamic and performance analysis methods using available catalog data; Master's Thesis, University of Gävle, 2013.
- [5] Russia Power, SGT5-2000E Gas Turbine - reliable, safe, and flexible power generation, Moskva, 2012.
- [6] <http://www.tekla.com/in/bim-awards-2013/bestindustrialsteel-%208INSTEEL.html>
- [7] <http://www.mhi.co.jp/power/product/turbine/steam/topics/img/hp-ip.jpg>
- [8] Galović, A., Termodinamika I, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2011.
- [9] Guzović, Z., Teorija turbostrojeva – podloge za predavanja, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2013.
- [10] Galović, A., Termodinamika II, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2010.
- [11] [https://www.steag-energyservices.com/uploads/pics/IT\\_Solutions\\_EBSILON\\_Professional\\_eng\\_01.pdf](https://www.steag-energyservices.com/uploads/pics/IT_Solutions_EBSILON_Professional_eng_01.pdf)
- [12] [http://www.steag-systemtechnologies.com/ebsilon\\_professional+M52087573ab0.html](http://www.steag-systemtechnologies.com/ebsilon_professional+M52087573ab0.html)
- [13] Ebsilon Professional Documentation – HTML datoteka pomoći
- [14] Stodola, A., Steam and gas turbines, P. Smith, New York, 1945.
- [15] Balatinec, L., Matematički model bloka K u TETO Zagreb, završni rad, Zagreb, 2017.
- [16] <http://klima.hr/klima.php?id=k1&param=srednjak&Grad=sisak>
- [17] <https://www.wunderground.com/>
- [18] [http://www.alentecinc.com/papers/NOx/The%20formation%20of%20NOx\\_files/The%20formation%20of%20NOx.htm](http://www.alentecinc.com/papers/NOx/The%20formation%20of%20NOx_files/The%20formation%20of%20NOx.htm)
- [19] <https://www.energy.siemens.com/ru/pool/hq/energy-topics/pdfs/en/techninal%20paper/Dry%20Low%20Emissions%20Experience.pdf>



- [20] Zakon o obnovljivim izvorima energije i visokoučinkovitoj kogeneraciji, Hrvatski sabor, Zagreb, 2015.  
[https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2015\\_09\\_100\\_1937.html](https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2015_09_100_1937.html)
- [21] Pravilnik o obnovljivim izvorima energije i visokoučinkovitoj kogeneraciji, Zagreb, 2016. - <https://esavjetovanja.gov.hr/ECon/MainScreen?entityId=2490>
- [22] <http://www.energetika-net.com/vijesti/obnovljivi-izvori-energije/snazna-hep-ova-kogeneracija-postala-povlasteni-proizvodac-energije-23143>
- [23] EnerING d.o.o, Blok L: Priprema dokumentacije potrebne za izdavanje rješenja o stjecanju statusa povlaštenog proizvođača električne energije, Zagreb, 2014.
- [24] HEP-Proizvodnja d.o.o, Tehničko-tehnološko rješenje usklađenja postojećeg postrojenja TE Sisak, Zagreb, 2013.
- [25] Energetski institut Hrvoje Požar, Program korištenja potencijala za učinkovitost u grijanju i hlađenju za razdoblje 2016.-2030., Zagreb, 2015.
- [26] Grad Sisak, Strateški plan grada Siska za razdoblje 2014.-2016., Sisak, 2014.
- [27] [http://files.hrote.hr/files/PDF/HR\\_kogen\\_2014.pdf](http://files.hrote.hr/files/PDF/HR_kogen_2014.pdf)
- [28] <http://hepi.hep.hr/cjenik>
- [29] <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1485940837646&uri=CELEX:52016DC0769>